AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ANÁLISES NEUTRÔNICA E TERMO-HIDRÁULICA DE DISPOSITIVOS PARA
IRRADIAÇÃO DE ALVOS TIPO LEU DE UALx-AL E U-Ni PARA PRODUÇÃO DE MO-99
NOS REATORES IEA-R1 E RMB**

DOUGLAS BORGES DOMINGOS

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

Orientador:

Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva

Coorientador:

Prof. Dr. Adimir dos Santos

**São Paulo
2014**

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

Análises neutrônica e termo-hidráulica de dispositivos para irradiação de alvos tipo LEU de UAlx-Al e U-Ni para produção de Mo-99 nos Reatores IEA-R1 e RMB

Douglas Borges Domingos

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

Orientador:
Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva
Coorientador:
Prof. Dr. Adimir dos Santos

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

São Paulo
2014

À Deus por todas as benções desta vida. Ao amor da minha vida, minha esposa Raquel, por toda dedicação e carinho. Aos meus pais Joaquim e Ely (in memoriam), pelo grande amor. Aos meus tios João Reis e Ivoní, pelo amor e influência. Às minhas irmãs Débora e Kamila, pelo imenso amor. Ao meu pequeno grande irmão Gabriel, pelo carinho e amor.

Agradecimentos

A Deus por toda benção, paz, amor, força, proteção, saúde e perseverança que me permitiram seguir em frente nos momentos difíceis dessa caminhada.

À minha esposa, Raquel Reis Alcântara, por todo o amor dedicado, pela força dada, pela confiança despejada, pela paciência e dedicação.

Ao meu pai, Joaquim Domingos Neto, pelo amor e confiança dedicados a mim ao longo dessa etapa. À minha mãe, Ely Maria Borges Domingos (in memoriam). Aos meus tios, João Batista Alves dos Reis e Ivoní de Freitas Reis, pelo amor, incentivo e influência. Aos meus irmãos pelo carinho e ajuda.

Ao Dr. Antonio Teixeira e Silva, pela orientação, confiança, dedicação, ensinamentos e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Adimir dos Santos, pela coorientação, confiança, dedicação e valiosos ensinamentos sem os quais esse trabalho não seria possível.

Aos pesquisadores Dr. Walmir Torres, MSc. Mitsuo Yamaguchi, MSc. Pedro Ernesto Umbehaun, Dra. Leda Cristina Cabelo Bernardes Fanaro, MSc. Graciete Simões de Andrade e Silva pelos ensinamentos.

Ao gerente do reator IPEN/MB-01 Rogério Gerez e ao operador Hugo Rodrigues Landim pelo apoio, dedicação e ensinamentos durante o desenvolvimento experimental deste trabalho.

Ao Centro do Combustível Nuclear (CCN) e aos pesquisadores Dr. Michelangelo Durazzo e MSc. Giovanni de Lima Cabral Conturbia pela dedicação e valiosa ajuda prestada neste trabalho com a fabricação das miniplacas de UAl_x-Al .

Aos amigos MSc. Rafael Oliveira Rondon Muniz, Dr. Pedro Carlos Russo Rossi, MSc. Luis Felipe Liambos Mura, Dr. Gabriel Angelo pela amizade, apoio e valiosos ensinamentos

e colaborações neste trabalho.

Aos amigos Cleiton Pertence da Silva, Thiago Rodrigues Oliveira, Cássio Santana, e Dr. Thiago Carluccio pela amizade e apoio.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro para a execução deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), pelo espaço cedido a todo material que pude utilizar. À Comissão de Pós-Graduação pelos cursos realizados.

E finalmente a todos os amigos que mesmo não citados, mas carinhosamente lembrados, colaboraram para a execução deste trabalho.

“O SENHOR é meu pastor; nada me faltará. Ele me faz repousar em pastos verdejantes. Leva-me para junto das águas de descanso; refrigera-me a alma. Guia-me pelas veredas da justiça por amor do seu nome. Ainda que eu ande pelo vale da sombra da morte, não temerei mal nenhum, porque tu estás comigo; o teu bordão e teu cajado me consolam.”

Salmos 23: 1-4

“Meu filho, se você aceitar as minhas palavras e guardar no coração os meus mandamentos; se der ouvidos à sabedoria e inclinar o coração para o discernimento; se clamar por entendimento e por discernimento gritar bem alto; se procurar a sabedoria como se procura a prata e buscá-la como quem busca um tesouro escondido, então você entenderá o que é temer o SENHOR e achará o conhecimento de DEUS. Pois o SENHOR é quem dá a sabedoria; de sua boca procedem o conhecimento e o discernimento. ELE reserva a sensatez para o justo; como um escudo protege quem anda com integridade, pois guarda a vereda do justo e protege o caminho de seus fiéis.”

Provérbios 2: 1-8

ANÁLISES NEUTRÔNICAS E TERMO-HIDRÁULICA DE DISPOSITIVOS PARA
IRRADIAÇÃO DE ALVOS TIPO LEU DE $\text{UAl}_x\text{-Al}$ E U-Ni PARA PRODUÇÃO DE
 ^{99}Mo NOS REATORES IEA-R1 E RMB

DOUGLAS BORGES DOMINGOS

Resumo

Neste trabalho foi realizado uma comparação entre três tipos de alvos ($\text{UAl}_2\text{-Al}$, U-Ni cilíndrico e U-Ni placa) para a produção de ^{99}Mo por fissão do ^{235}U . Para isso foram desenvolvidas análises neutrônicas e termo-hidráulicas. Também foram realizados experimentos para se validar as metodologias de cálculo termo-hidráulica e neutrônica utilizadas neste trabalho. Para os cálculos neutrônicos foram utilizados os programas NJOY99.0, AMPX-II e HAMMERTECHNION, para geração das seções de choque, e os programas SCALE 6.0 e CITATION para os cálculos tridimensionais dos núcleos, queima do combustível e produção de ^{99}Mo . Para os cálculos termo-hidráulicos foram utilizados os programas MTRCR-IEAR1 e ANSYS CFX para calcular as variáveis térmicas e hidráulicas dos dispositivos de irradiação e compará-las a limites e critérios de projeto estabelecidos. Primeiro foram realizadas análises neutrônicas e termo-hidráulicas para o reator IEA-R1 com os alvos de $\text{UAl}_2\text{-Al}$ (10 miniplacas). As análises demonstraram que a atividade total obtida para o ^{99}Mo nas miniplacas não atende à demanda dos hospitais brasileiros (450 Ci/semana) e que nenhum limite de projeto termo-hidráulico é ultrapassado. Em seguida foram realizados os mesmos cálculos para os três tipos de alvo no Reator Multipropósito Brasileiro (RMB). As análises neutrônicas demonstraram que os três alvos podem atender à demanda dos hospitais brasileiros. As análises termo-hidráulicos demonstram que será necessário uma velocidade mínima no dispositivo de irradiação de 7 m/s para o UAl_2 , de 8 m/s para o alvo de U-Ni cilíndrico e de 9 m/s para o alvo de U-Ni placa para que nenhum limite de projeto seja ultrapassado. Foram realizados experimentos em uma bancada de aferição de vazão para se validar a metodologia de cálculo termo-hidráulico. Os experimentos realizados para se validar os cálculos neutrônicos foram feitos no reator IPEN/MB-01. Todos os experimentos foram simulados com as metodologias acima descritas e os resultados comparados entre si. Os resultados das simulações apresentaram boa concordância com os resultados experimentais.

NEUTRONIC AND THERMAL-HYDRAULIC ANALYSIS OF DEVICES FOR
IRRADIATION OF LEU TARGETS TYPE OF $\text{UAl}_x\text{-Al}$ AND U-Ni TO
PRODUCTION OF ^{99}Mo IN REACTOR IEA-R1 AND RMB

DOUGLAS BORGES DOMINGOS

Abstract

In this work neutronic and thermal-hydraulic analyses were made to compare three types of targets ($\text{UAl}_2\text{-Al}$, U-Ni cylindrical and U-Ni plate) used for the production of ^{99}Mo by fission of ^{235}U . Some experiments were conducted to validate the neutronic and thermal-hydraulics methodologies used in this work. For the neutronic calculations the computational programs NJOY99.0, AMPX-II and HAMMERTECHNION were used to generate the cross sections. SCALE 6.0 and CITATION computational programs were used for three-dimensional calculations of the reactor cores, fuel burning and the production of ^{99}Mo . The computational programs MTRCR-IEAR1 and ANSYS CFX were used to calculate the thermal and hydraulic parameters of the irradiation devices and for comparing them to limits and design criteria. First were performed neutronic and thermal-hydraulic analyzes for the reactor IEA-R1 with the targets of $\text{UAl}_2\text{-Al}$ (10 miniplates). Analyses have shown that the total activity obtained for ^{99}Mo on the miniplates does not meet the demand of Brazilian hospitals (450 Ci/week) and that no limit of thermo-hydraulic design is overtaken. Next, the same calculations were performed for the three target types in Multipurpose Brazilian Reactor (MBR). The neutronic analyzes demonstrated that the three targets meet the demand of Brazilian hospitals. The thermal hydraulic analysis shows that a minimum speed of 7 m/s for the target $\text{UAl}_2\text{-Al}$, 8 m/s for the cylindrical target U-Ni and 9 m/s for the target U-Ni plate will be necessary in the irradiation device to not exceed the design limits. Were performed experiments using a test bench for validate the methodologies for the thermal-hydraulic calculation. The experiments performed to validate the neutronic calculations were made in the reactor IPEN/MB-01. All experiments were simulated with the methodologies described above and the results compared. The simulations results showed good agreement with experimental results.

Lista de Figuras

3.1	Dispositivo para Irradiação de Miniplacas Combustíveis (DIM).	25
3.2	Seção transversal do DIM.	26
3.3	Dimensões das miniplacas combustíveis de UAl_2-Al	27
3.4	Secção transversal horizontal do dispositivo de irradiação para o alvo de U-Ni com geometria cilíndrica.	29
3.5	Conjunto de cilindros concêntricos posicionados no Dispositivo para Irradiação de Miniplacas Combustíveis (DIM).	30
3.6	Conjunto de cilindros concêntricos.	31
3.7	Meia espessura da placa de U-Ni e do canal de refrigeração.	31
3.8	Largura e altura das placas de U-Ni.	32
3.9	Representação esquemática do núcleo do reator IEA-R1.	33
3.10	Núcleo do reator IEA-R1 - Desenho Esquemático Configuração 236.	35
3.11	Dois estojos iguais dispostos em dois andares.	37
3.12	Estojos posicionados no DIM.	38
3.13	Temperaturas calculadas nas miniplacas de UAl_2-Al em função da velocidade para o reator IEA-R1.	39
3.14	Temperaturas obtidas nas miniplacas de UAl_2-Al em função da velocidade para o reator RMB.	42
3.15	Temperaturas obtidas no alvo de U-Ni cilíndrico em função da velocidade para o reator RMB.	44
3.16	Temperaturas obtidas nas miniplacas de U-Ni em função da velocidade para o reator RMB.	46

3.17	Comparação entre as atividades de ^{99}Mo calculadas com Equação 3.1 e as simuladas com o SCALE 6.0.	48
4.1	Tubo de alumínio da bancada termo-hidráulica.	52
4.2	Bomba da bancada termo-hidráulica.	53
4.3	Placa de Orifício da bancada termo-hidráulica e Validyne.	53
4.4	Desenho esquemático do aparato experimental.	54
4.5	Demoduladores dos Validynes e multímetro Digital.	55
4.6	Gráfico ΔP x Vazão experimental para o DIM composto com o estojo e as 10 miniplacas.	57
4.7	Gráfico ΔP x Vazão experimental para o DIM sem o estojo e as 10 miniplacas.	57
4.8	Configuração 226 de operação do núcleo do reator IEA-R1.	61
4.9	Queda de pressão $\Delta P_{DMPV-01}$ e $\Delta P_{núcleo}$ versus vazão no circuito primário do IEA-R1.	62
4.10	Geometria do elemento em corte com miniplacas e estojo (a) e sem estojo (b).	64
4.11	Simplificação geométrica para a condição com estojo e miniplacas (a) e sem estojo (b).	65
4.12	Refinamento de malha para as condições com estojo e miniplacas (a) e sem estojo (b).	66
4.13	Gráfico ΔP x Vazão simulado com o Programa CFX para o DIM composto com o estojo e as 10 miniplacas.	68
4.14	Gráfico ΔP x Vazão simulado com o Programa CFX para o DIM sem o estojo.	68
4.15	Pressão na região de simetria.	69
4.16	Mapa de cores indicando velocidade na seção de simetria do canal.	70
4.17	Canais internos e adjacentes à parede do elemento combustível.	70
4.18	Variação de vazão em massa nos canais.	71
4.19	Distribuição de fluxo de calor na direção axial (eixo z).	72
4.20	Mapa de cores indicando a temperatura na região de simetria das miniplacas.	74
4.21	Temperaturas calculadas pelos programas CFX e MTRCR-IEAR1 no revestimento das miniplacas.	75
4.22	Vista do núcleo: configuração retangular do reator IPEN/MB-01.	76
4.23	Caixa refletora de Al.	78

4.24	Miniplacas de UAl_x -Al mais o estojo.	78
4.25	Sistema para espectrometria gamma Ortec.	79
4.26	Sistema para espectrometria gamma Canberra.	79
4.27	Suporte para irradiação das miniplacas.	82
4.28	Régua suporte para varredura das miniplacas.	82
4.29	Régua suporte para varredura com a miniplaca sendo posicionada o detector.	83
4.30	Núcleo 26 x 28 do reator IPEN/MB-01.	84
4.31	Perfil das atividades medidas das 5 folhas.	87
4.32	Comparação das atividades simuladas e medidas das 5 folhas.	88
4.33	Perfil das atividades de ^{99}Mo medidas em cada uma das 10 miniplacas.	90
4.34	Comparação das atividades de ^{99}Mo simuladas e medidas das 10 miniplacas.	91
4.35	Valor do K_{eff} simulado (SCALE 6.0 e CITATION) e experimental.	97
4.36	Diferenças do K_{eff} entre os valores encontrados para as simulações e os experimentais.	98
B.1	Processamento de Dados Nucleares para Cálculos Determinísticos.	124
D.1	Geometria da simulação da miniplaca posicionada no detector Canberra.	135
E.1	Caminhos de decaimento do ^{99}Mo para o ^{99}Tc estável.	137

Lista de Tabelas

3.1	Raio dos materiais dos alvo de U-Ni cilíndrico.	29
3.2	Temperaturas obtidas nos alvos de UAl_2 -Al em função da variação da velocidade para o IEA-R1.	39
3.3	Temperaturas obtidas nos alvos de $UAlx$ -Al em função da variação da velocidade para o RMB.	42
3.4	Temperaturas obtidas no alvo de U-Ni cilíndrico em função da variação da velocidade para o RMB.	44
3.5	Temperaturas obtidas nos alvos de U-Ni placa em função da variação da velocidade para o RMB.	46
3.6	Valores calculados com a Equação 3.1 e valores simulados com SCALE 6.0 para a atividade de ^{99}Mo	47
4.1	Curva experimental da placa de orifício.	55
4.2	Vazão calculada para a placa de orifício com o DIM composto com o estojo e as 10 minplacas.	56
4.3	Vazão calculada para a placa de orifício com o DIM sem o estojo.	56
4.4	Vazão calculada com o coeficiente de perda de carga obtido para o DIM composto com o estojo e as 10 minplacas.	58
4.5	Vazão calculada com o coeficiente de perda de carga obtido para o DIM sem o estojo e as 10 minplacas.	59
4.6	Desvio relativo entre as vazões medidas e calculadas para o DIM composto com estojo mais 10 as miniplacas.	59

4.7	Desvio relativo entre as vazões medidas e calculadas para o DIM sem o estojo e as 10 as miniplacas.	60
4.8	Temperaturas obtidas nos alvos de $\text{UAl}_2\text{-Al}$ em função da variação da velocidade para o IEA-R1.	63
4.9	Variação de vazão em massa (máxima) nos canais internos e nos canais adjacentes a parede do elemento combustível.	71
4.10	Desvio relativo entre as temperaturas calculadas pelos programas CFX e MTRCR-IEAR1.	73
4.11	Massa das 5 folhas hiper-puras de Au.	85
4.12	Atividade medida em cada uma das 5 folhas de Au.	86
4.13	Atividade simulada em cada uma das 5 folhas de Au.	87
4.14	Atividade do ^{99}Mo medida em cada uma das miniplacas para a região de eficiência do detector.	89
4.15	Atividade do ^{99}Mo simulada em cada uma das miniplacas para a região de eficiência do detector.	91
4.16	Fluxo de nêutrons na região do detector.	93
4.17	Valor do K_{eff} simulado (SCALE 6.0 e CITATION) e experimental.	97
4.18	Diferenças do K_{eff} entre os valores encontrados para as simulações e os experimentais.	98
A.1	Composição química do material base para fabricação do pó de UAl_2	106
A.2	Composição química do material base para fabricação do pó de Alumínio.	109
A.3	Limites da composição química do alumínio Liga 6061.	112
A.4	Propriedades mecânicas requeridas à temperatura ambiente da liga 6061 (T0).	112
A.5	Dimensões do alvo para produção de ^{99}Mo	113
D.1	Energias características e abundância gama do ^{152}Eu	133
D.2	Eficiência obtida para cada energia.	133

Sumário

1. Introdução	17
1.1 Motivação	17
1.2 Objetivo da Tese	18
1.3 Aspectos Relevantes e Originalidade	19
2. Revisão Bibliográfica	20
3. Análise dos Alvos para os Reatores IEA-R1 e RMB	24
3.1 Descrição dos Alvos	26
3.1.1 UAl ₂ -Al	26
3.1.2 U-Ni Cilíndrico	28
3.1.3 U-Ni Placa	31
3.2 Análise dos Alvos para o Reator IEA-R1	32
3.2.1 Reator IEA-R1	32
3.2.2 Critérios e Limites de Projeto Termo-hidráulico	34
3.2.3 Cálculos Neutrônicos e Termo-hidráulicos dos Alvos de UAl ₂ -Al para o IEA-R1	36
3.3 Análise dos Alvos para o Reator RMB	40
3.3.1 Reator RMB	40
3.3.2 Critérios e Limites de Projeto Termo-hidráulicos	40
3.3.3 Cálculos Neutrônicos e Termo-hidráulicos dos Alvos de UAl ₂ -Al para o RMB	40

3.3.4	Cálculos Neutrônicos e Termo-hidráulicos do Alvo U-Ni Cilíndrico para o RMB	43
3.3.5	Cálculos Neutrônicos e Termo-hidráulicos dos Alvos de U-Ni Placa para o RMB	45
3.4	Verificação da Produção de ^{99}Mo nos Alvos	47
3.5	Análise dos Cálculos	48
4.	<i>Validação das Análise Neutrônica e Termo-hidráulica Através de Experimentos</i> .	50
4.1	Verificação Térmica e Hidrodinâmica	50
4.1.1	Aparato Experimental	50
4.1.2	Cálculo da Vazão no DIM para o Reator IEA-R1	60
4.1.3	Modelo Numérico Tridimensional	63
4.2	Verificação Neutrônica	75
4.2.1	Reator IPEN/MB-01	75
4.2.2	Aparato Experimental	76
4.2.3	Análise de Criticalidade	93
5.	<i>Conclusões</i>	99
	<i>Apêndice</i>	102
A.	<i>Especificação das Miniplacas Combustíveis de $\text{UAl}_x\text{-Al}$</i>	103
A.1	Objetivo	103
A.2	Documentos Aplicáveis	103
A.2.1	Especificações Técnicas de Referência	103
A.2.2	<i>American Society for Testing and Materials (ASTM) Standards</i> . .	104
A.2.3	Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)	105
A.3	Descrição da Miniplaca Alvo e Componentes	105
A.4	Materiais	105
A.4.1	Requisitos para o Material Combustível	105
A.4.2	Requisitos para o Pó de Al	108
A.4.3	Requisitos para a Moldura e Revestimento	111

A.5	Características Físicas	113
A.5.1	Dimensões da Miniplaca Alvo	113
A.5.2	Quantidade de Material Combustível	113
A.6	Inspeção da Miniplaca Alvo Acabada	114
A.6.1	Ensaio não Destrutivos	114
A.6.2	Ensaio Destrutivos	115
A.7	Identificação	115
A.7.1	Tipo de Identificação	115
A.7.2	Método de Marcação	115
A.8	Limpeza e Acabamento	116
A.9	Manuseio, Embalagem, Transporte e Armazenamento	116
A.10	Documentos Requeridos e Certificados	116
A.11	Programa de Garantia da Qualidade	116
B.	<i>Descrição dos Programas Utilizados</i>	117
B.1	HAMMERTECHNION	117
B.2	Programa Computacional CITATION	118
B.3	SCALE 6.0	120
B.4	MTRCR-IEAR1	120
B.5	Ansys CFX [®]	121
B.6	AMPEX-II e NJOY99.0	122
C.	<i>Input do Programa MTRCR-IEAR1</i>	126
C.1	INPUT - UAl _x -Al - Irradiação das Miniplacas na Posição Central do Reator IEA-R1	126
D.	<i>Determinação da Eficiência do Detector Canberra para o Cálculo das Atividades das Miniplacas</i>	133
E.	<i>Dedução da Equação para o Cálculo da Atividade do ⁹⁹Mo</i>	136
F.	<i>Input do Programa SCALE 6.0 - Experimento 1</i>	139
F.1	Input - Experimento 1	139

G. Input do Programa CITATION 154

 G.1 Caso 1 154

H. Input do Programa SCALE 6.0 169

 H.1 Caso 1 169

Referências 186

Introdução

1.1 Motivação

Tecnécio-99 (^{99}Tc), o produto do decaimento do molibdênio-99 (^{99}Mo), é utilizado anualmente em 20-25 milhões de procedimentos de diagnóstico médico no mundo, abrangendo cerca de 80% de todos os procedimentos na medicina nuclear. Outros isótopos médicos importantes tais como o ^{131}I e o ^{133}Xe podem ser recuperados durante o processo de obtenção do ^{99}Mo . Estes radioisótopos estão sendo usados em aplicações diagnósticas e terapêuticas e têm aplicações promissoras na área da radioimunoterapia [1].

Desde 2004 a *International Atomic Energy Agency* (IAEA) tem ajudado, através do *Coordinated Research Project* (CRP) [2], alguns países a iniciar a produção, em pequena escala, de ^{99}Mo . O objetivo do CRP é fornecer aos países interessados o acesso a tecnologias para produção de ^{99}Mo usando alvos de urânio com baixo enriquecimento (*Low Enriched Uranium* - LEU). O Brasil, através do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), iniciou a sua participação neste CRP no final de 2009.

O uso de radiofármacos no país vem crescendo rapidamente e o IPEN é o principal distribuidor dos geradores de ^{99}Tc (fornecendo radiofármacos para mais de 300 hospitais e clínicas no país) os mais utilizados e responsáveis por mais de 80% das aplicações de radiofármacos no Brasil. O IPEN importa todo o ^{99}Mo usado no país, que atinge 450 Ci por semana e cerca de 24.000 Ci por ano.

O crescente aumento da necessidade da medicina nuclear do país somada a escassez no fornecimento de ^{99}Mo observada desde 2008 no cenário mundial levou o IPEN a desenvolver um projeto próprio para produzir ^{99}Mo através da fissão do ^{235}U . Este projeto tem três

objetivos principais:

1. pesquisa e desenvolvimento para a produção de ^{99}Mo por fissão de alvos LEU;
2. discussão e decisão sobre a melhor rota técnica de produção;
3. estudo da exequibilidade do IPEN em atender uma produção rotineira de ^{99}Mo .

Entre as pesquisas programadas neste projeto está o estudo das características e especificação de alvos. Para se definir qual tipo de alvo deve ser utilizado, uma série de análise deve ser realizada para se garantir a produção de ^{99}Mo necessária. Também deve-se garantir que os processos mais eficientes estão sendo utilizados ao longo da produção. Para isso as análises devem garantir a segurança durante a irradiação, transporte, processamento e distribuição do ^{99}Tc . O foco deste trabalho é fazer um estudo, para os reatores brasileiros (IEA-R1 e Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), hora em fase final de concepção), neutrônico e termo-hidráulico dos diferentes tipos de alvos utilizados no mundo para produção de ^{99}Mo e compará-los. Também foram realizados experimentos para se validar as metodologias utilizadas e garantir a acurácia das análises.

1.2 Objetivo da Tese

O objetivo desta tese de doutorado é comparar através de cálculos neutrônicos e termo-hidráulicos três tipos de alvo ($\text{UAl}_2\text{-Al}$, U-Ni cilíndrico e U-Ni placa) e escolher dentre eles o mais adequado e viável para a produção de ^{99}Mo no Brasil. Os cálculos serão realizados considerando a produção do ^{99}Mo no reator IEA-R1 do IPEN e no RMB.

Nos cálculos neutrônicos serão utilizados os programas AMPX-II e HAMMERTECHNION, para gerar as seções de choque dos componentes dos reatores envolvidos (combustíveis, alvos, placa matriz e etc.) e os programas SCALE 6.0 e CITATION para a modelagem tridimensional dos núcleos, análise de criticalidade, queima dos combustível e produção de ^{99}Mo . Para os cálculos termo-hidráulicos serão utilizados os programas MTRCR-IEAR1 e ANSYS CFX para calcular as variáveis térmicas e hidráulicas (vazão, temperatura, coeficiente de perda de carga, etc) dos dispositivos de irradiação e compará-las a limites e critérios de projeto estabelecidos. As metodologias de cálculo serão validadas através de experimentos. Os experimentos realizados para se validar os cálculos neutrônicos serão

feitos no reator IPEN/MB-01. Para se validar a metodologia de cálculo termo-hidráulico foram realizados experimentos em uma bancada de aferição de vazão.

O capítulo 2 desta dissertação apresenta o levantamento bibliográfico relativo à produção mundial de ^{99}Mo em reatores de pesquisa, sintetizando os aspectos mais relevantes do programa do IPEN-CNEN/SP. No capítulo 3 é apresentado o estudo neutrônico e termo-hidráulico para os alvos, do tipo LEU, pesquisados nesta tese para a produção de ^{99}Mo . No capítulo 4 são apresentados os experimentos e as simulações realizados neste trabalho para validar as metodologias de cálculo. As conclusões são apresentadas no capítulo 5.

1.3 Aspectos Relevantes e Originalidade

Este trabalho contribui com estudos comparativos de alvos nunca utilizados para a produção de ^{99}Mo no Brasil. Esses estudos indicam se os três a serem alvos analisados para o RMB poderão ser utilizados para a produção de ^{99}Mo . As análises realizadas para o reator IEA-R1 indicam que este poderia contribuir de forma significativa com a produção de ^{99}Mo , mas estudos mais detalhados devem ser realizados. Também deve-se destacar que a validação das metodologias utilizadas nestes trabalho contribuem muito para futuros trabalhos. Os experimentos realizados no reator IPEN/MB-01 nunca haviam sido realizados no Brasil. Esses experimentos permitiram a validação do módulo T5-DEPL do SCALE 6.0, que nunca havia sido comparado a experimentos realizados no Brasil, apenas a *benchmarks* internacionais.

Revisão Bibliográfica

Atualmente, 95-99% de todo o ^{99}Mo é produzido em reatores de pesquisa, de teste de materiais e de produção de radioisótopos pela irradiação de alvos de urânio altamente enriquecido (*High Enriched Uranium* - HEU, geralmente 93% de ^{235}U), que são posteriormente processados para a recuperação do ^{99}Mo . Alvos para este tipo de produção são geralmente de: 1) miniplacas combustíveis e varetas (pin) revestidas de Al, contendo ligas de U-Al ou dispersão do tipo UAl_x [2,10] ou 2) um filme fino de UO_2 envolvendo a parede interna de um tubo de aço inox [11,12]. Após a irradiação, o ^{99}Mo é separado do urânio e dos produtos de fissão.

Até 2009, os quatro maiores produtores de ^{99}Mo , todos eles utilizando alvos HEU e instalações de processamento dedicadas, eram: 1) *MDS Nordion* (Canadá), 2) *Malinkrodt* (Países Baixos), 3) IRE (*Institut National des Radioelements*, Bélgica) e 4) *NTP Radioisotopes* (PTy) Ltd (África do Sul).

De 1-5% da produção mundial remanescente de ^{99}Mo é obtida pela irradiação de alvos com baixo enriquecimento de urânio (*Low Enriched Uranium* - LEU). A ANSTO (*Australian National Science and Technology Organization*) sempre usou LEU [13] e a CNEA (*Comisión Nacional de Energia Atómica*) da Argentina converteu os seus alvos para LEU em 2002 [14,15]. Adicionalmente, pequenas quantidades de ^{99}Mo são produzidas pela irradiação de molibdênio natural (por ativação neutrônica de ^{98}Mo). Índia, China e Cazaquistão usam esta técnica [16].

Tanto a ANSTO como a CNEA usam e planejam continuar usando alvos LEU para a produção de ^{99}Mo . A ANSTO foi um fornecedor regional de ^{99}Mo por muitos anos utilizando alvos com ^{235}U enriquecido a 2,2%, contendo pastilhas de UO_2 que eram irradiadas

no reator HIFAR (*High Flux Australian Reactor*). Após a inauguração do reator OPAL (*Open Pool Australian Light-Water Reactor*), em 2007, eles decidiram utilizar alvos LEU e os processos utilizados pela CNEA para ampliar a sua produção. A CNEA utiliza como alvos miniplacas da dispersão de UAl_2 em uma matriz de Al ($\text{UAl}_2\text{-Al}$), com enriquecimento de 19,9% de ^{235}U , que foi selecionada principalmente devido as suas características convenientes, como uma densidade de $6,42 \text{ gU/cm}^3$.

A preocupação mundial com a utilização de alvos do tipo HEU para a produção de ^{99}Mo , tem sido um dos motores do Programa RERTR (*Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*) [17]. Em 1986, o desenvolvimento de combustíveis de siliceto de urânio e de novos programas computacionais e análises tornaram possível a conversão do núcleo de vários reatores no mundo de combustíveis HEU para combustíveis LEU. Com a conversão dos reatores, a produção de ^{99}Mo tornou-se aproximadamente 20% do HEU exportado tendo um crescimento contínuo de 10% ao ano. Além disso, havia outra preocupação com a utilização de alvos HEU na produção do ^{99}Mo : somente uma pequena quantidade do ^{235}U é queimada durante a irradiação, tornando o material altamente atraente.

Um dos maiores colaboradores do programa RERTR é o ANL (*Argonne National Laboratory*) dos Estados Unidos da America (EUA). Desde 1995, o ANL vem concentrando esforços em pelo menos três áreas principais: 1) cooperação com a Argentina para demonstrar o uso de alvos de folhas finas de urânio metálico LEU em processos de produção de ^{99}Mo com dissolução alcalina; 2) cooperação com a Indonésia na conversão do processo *Cintichen* de alvos HEU para alvos de folhas finas de urânio metálico LEU; 3) participação em um CRP (*Coordinated Research Project*) da IAEA (*International Atomic Energy Agency*) para a produção doméstica de ^{99}Mo .

O alvo de folhas finas de urânio metálico LEU proposto para utilização no CRP da IAEA é feito de dois tubos concêntricos de alumínio. Entre estes dois tubos é colocada uma folha fina de urânio metálico LEU recoberta nos dois lados por uma folha de níquel que atua como uma barreira para os produtos de fissão gerados durante a irradiação. Após a irradiação do alvo, ele é desmontado em células quentes de alta atividade usando uma máquina de corte para liberar as folhas de urânio metálico e de níquel. O processo químico *Cintichen* modificado é utilizado para a dissolução das folhas irradiadas no ácido nítrico, recuperando o ^{99}Mo por técnicas de precipitação e posterior purificação da solução através

de colunas de troca iônica. Vários procedimentos de controle de qualidade da solução de ^{99}Mo purificada são aplicados para verificar se o ^{99}Mo está apto para uso médico. A seguir são produzidos os geradores ^{99}Mo - ^{99}Tc .

Cintichen Inc. era o maior fornecedor de ^{99}Mo para uso médico nos EUA até 1989, quando a produção foi paralisada devido a questões operacionais e custos associados para reparos. O processo de produção estabelecido pela *Cintichen* (processo *Cintichen*) [18] começou com a irradiação de alvos de óxidos HEU envolvendo a parte interna de um tubo de aço inox e irradiados em um reator de 5 MW em Tuxedo N.Y. O óxido de urânio irradiado era então dissolvido em uma solução de ácidos nítrico e sulfúrico. O ^{99}Mo era purificado por precipitação seguido de passos de purificação em colunas iônicas. Este processo estabelecido serviu como um ponto de partida para o desenvolvimento dos processos de produção de ^{99}Mo com LEU e ficou conhecido como processo *Cintichen* modificado.

A CNEA da Argentina é um forte parceiro do programa RERTR e está em estreita cooperação com o ANL. A conversão dos alvos HEU para UAl_2 -Al LEU em 2002 foi feita com pequenas modificações nas posições de irradiação do reator. Este alvo LEU permitiu a Argentina continuar a produção de ^{99}Mo na mesma quantidade que vinha sendo obtida com alvos HEU. A longo prazo, entretanto, havia o interesse em desenvolver, em cooperação com o ANL, a produção de ^{99}Mo através de folhas finas de urânio metálico do tipo LEU. Isto permitiria triplicar a produção caso fossem utilizadas as mesmas posições de irradiação dos alvos tipo dispersão e poderia reduzir de seis a dez vezes o rejeito líquido do processamento e por pelo menos 4 horas o tempo de processamento.

A Agencia de Energia Atômica da Indonésia, *BADAN Tenaga Atom Nasional* (BATAN) tem cooperado com o ANL há vários anos e a expectativa é converter seus alvos e o processamento *Cintichen* de alvos altamente enriquecidos para alvos de folhas finas tipo LEU e para o processo *Cintichen* modificado para LEU. BADAN também tem trabalhado em cooperação com o ANL na fabricação dos alvos de folhas finas LEU [18].

Em vista do interesse mundial na produção de ^{99}Mo , desde 2004 a IAEA tem desenvolvido e implementado um Projeto de Pesquisa Coordenado (CRP) [20] para ajudar os países interessados a iniciar uma produção doméstica em pequena escala de ^{99}Mo e de forma a encontrar os requisitos da medicina nuclear local. O objetivo do CRP é fornecer aos países interessados o acesso a tecnologias não proprietárias e métodos para produção

de ^{99}Mo usando alvos de folhas finas de urânio metálico LEU, miniplacas LEU, ou pela ativação neutrônica (n,gama), por exemplo, através do uso de geradores gel [20]. O Brasil através do IPEN iniciou a sua participação neste CRP no final de 2009.

O IPEN fornece radiofármacos para mais de 300 hospitais e clínicas no país, atingindo mais de 3,5 milhões de procedimentos médicos por ano. O uso de radiofármacos no país cresceu na última década a uma taxa de 10% ao ano e o IPEN é o principal responsável por esta distribuição. Os geradores de ^{99}Tc são os mais utilizados e são responsáveis por mais de 80% das aplicações de radiofármacos no Brasil.

O IPEN importa todo o ^{99}Mo usado no país, que atinge 450 Ci por semana e cerca de 24.000 Ci por ano. Até 2009, o principal fornecedor era a *MDS Nordion* do Canadá. O ^{99}Mo importado pelo Brasil representa 4% da produção mundial.

No passado, o IPEN desenvolveu a rota de produção de ^{99}Mo por ativação neutrônica de alvos de ^{98}Mo no reator IEA-R1. Entretanto, a quantidade produzida não atendeu as necessidades brasileiras deste isótopo.

Devido à crescente necessidade da medicina nuclear do país e devido à escassez no fornecimento de ^{99}Mo observada desde 2008 no cenário mundial, o IPEN decidiu desenvolver um projeto próprio para produzir ^{99}Mo através da fissão do ^{235}U . Este projeto tem três objetivos principais: 1) pesquisa e desenvolvimento para a produção de ^{99}Mo por fissão de alvos LEU; 2) discussão e decisão sobre a melhor rota técnica de produção; e 3) estudo da exequibilidade do IPEN em atender uma produção rotineira de ^{99}Mo . O principal objetivo do IPEN é atender a demanda brasileira de radiofármacos de cerca de 450 Ci de ^{99}Mo por semana e uma necessidade futura, após sete anos, de 1.000 Ci por semana.

Dentre as pesquisas programadas neste projeto, está o estudo das características e especificação de alvos dos seguintes tipos: 1) UAl_x disperso em Al com 3,0 gU/cm³; 2) folhas finas de urânio metálico LEU em diferentes processos de produção e revestimento de alumínio; e 3) UO_2 em diferentes processos de produção e revestimentos. Também serão desenvolvidos neste projeto estudos laboratoriais para os seguintes processos a frio: 1) processo de dissolução alcalina; 2) processo de dissolução ácida; 3) processo de dissolução *Cintichen* modificado; 4) otimização da recuperação do Mo em todos os processos e 5) tratamento de rejeitos e processos de imobilização.

Análise dos Alvos para os Reatores IEA-R1 e RMB

Para poder avaliar a produção de ^{99}Mo via fissão nuclear nos reatores nucleares brasileiros, IEA-R1 e Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) (hora em fase final de concepção), foi proposto um estudo neutrônico e termo-hidráulico dos alvos mais utilizados pelo mundo. Inicialmente foram escolhidos dois tipos de alvos LEU ($\text{UAl}_2\text{-Al}$ e U-Ni cilíndrico) para o desenvolvimento deste trabalho, mas durante uma pesquisa bibliográfica foi encontrado um artigo [12], do *Pakistan Institute of Nuclear Science and Technology* (PINS-TECH) do Paquistão, onde os autores utilizaram como alvo U-Ni em geometria retangular (placa). No artigo citado foram realizadas análises neutrônicas e termo-hidráulicas para três miniplacas de U-Ni com 11,785 g de U (2,357 g ^{235}U) cada. A análise foi realizada para o reator de pesquisa tipo piscina *Pakistan Research Reactor-1* (PARR-1) de 10 MW, semelhante ao reator IEA-R1. Ao final de 15,67 horas de irradiação são produzidos 100 Ci de ^{99}Mo , quantidade essa suficiente para atender a demanda do Paquistão, e nenhum limite de segurança termo-hidráulico foi atingido.

O IPEN possui uma ampla experiência em projeto, fabricação e utilização de combustíveis tipo placa para reatores de pesquisa, então decidiu-se elaborar, baseando-se no artigo acima citado, um alvo de U-Ni placa conceitual para análise. O alvo tipo placa foi dimensionado para ser acoplado a um Dispositivo para Irradiação de Miniplacas Combustíveis (DIM), que possui capacidade para acomodar até 10 miniplacas, e ter a mesma quantidade total em massa de urânio do outros dois alvos.

O Centro de Engenharia Nuclear (CEN) do IPEN, onde esta tese foi desenvolvida, tem experiência no projeto de irradiadores para colocação no núcleo. O CEN projetou e fabricou o primeiro irradiador de miniplacas (DIM), que está sendo utilizado no reator

IEA-R1 para a qualificação sob irradiação de miniplacas combustíveis do tipo dispersão de U_3Si_2-Al e U_3O_8-Al de alta densidade. Esse combustíveis, após qualificados, serão utilizados nos núcleos dos reatores de pesquisa do Brsail (IEA-R1 e RMB, hora em fase final de concepção). A Figura 3.1 apresenta uma foto do DIM. A Figura 3.2 apresenta a seção transversal do DIM.

Figura 3.1: Dispositivo para Irradiação de Mini-placas Combustíveis (DIM).

Figura 3.2: Seção transversal do DIM.

3.1 Descrição dos Alvos

3.1.1 UAl_2 -Al

Os alvos de UAl_2 -Al do tipo LEU a serem desenvolvidos no IPEN e analisados nesta tese serão a princípio baseados nos alvos produzidos na Argentina e utilizados para produção de ^{99}Mo desde 2002.

Estes alvos, na forma de miniplacas revestidas com Al, têm um volume total de 12,14 cm^3 com 0,152 cm de espessura, 3,5 cm de largura e 17,0 cm de comprimento, Figura 3.3.

O volume total do cerne de UAl_2-Al é de $3,5872 \text{ cm}^3$ com $0,076 \text{ cm}$ de espessura, $4,0 \text{ cm}$ de largura e $11,8 \text{ cm}$ de comprimento.

Figura 3.3: Dimensões das miniplacas combustíveis de UAl_2-Al .

A massa de ^{235}U no alvo é de $2,07 \text{ g}$ que para um volume de $3,5872 \text{ cm}^3$ fornece uma densidade de ^{235}U igual a $0,58 \text{ g}^{235}\text{U}/\text{cm}^3$. Com um enriquecimento de $19,9\%$ em ^{235}U , a densidade do urânio no alvo é de $\rho_U = 2,91 \text{ gU}/\text{cm}^3$. Este valor corresponde uma fração em volume de UAl_2 de 45% e uma fração em volume de alumínio de 55% na dispersão. Estes valores indicam que os argentinos estão construindo os alvos no limite tecnológico para este tipo de dispersão (45% da fase fissil em volume dispersa em 55% da fase não fissil em volume). Este conceito já era esperado devido à necessidade de se ter em alvos LEU cinco vezes a quantidade de urânio dos alvos HEU para manter a mesma quantidade de ^{235}U .

3.1.2 U-Ni Cilíndrico

Os alvos de U-Ni com geometria cilíndrica analisados no IPEN foram baseados nos alvos que foram examinados no reator Tajoura na Líbia para a produção de ^{99}Mo [15]. O material destes alvos é o urânio metálico, em *foils* ou lâminas, com espessura média bruta de $135\text{ }\mu\text{m}$, com valor mínimo de $95\text{ }\mu\text{m}$ e máximo de $207\text{ }\mu\text{m}$. A massa total de ^{235}U no alvo é de 20,1 g com 19,9% de enriquecimento. Os alvos foram montados em geometria cilíndrica, arranjo tubular. O material dos tubos é o Al-3003, que foram desengraxados em ultra-som e limpos superficialmente com soda cáustica a 70°C . A folha metálica de U foi coberta com uma folha de Ni antes de ser colocado concentricamente dentro de tubos de alumínio. Este arranjo foi expandido mecanicamente, de modo a se aumentar o contato térmico entre os tubos e o *foil*, evitando a presença de ar no arranjo. As dimensões do alvo, Figura 3.4, são:

- Uma folha de urânio (LEU) de 46,05 cm x 87,7 mm x $135\text{ }\mu\text{m}$;
- Folha de revestimento de níquel, de $20\text{ }\mu\text{m}$ de espessura;
- Dois cilindros de alumínio tendo 46,05 cm de comprimento, diâmetros exteriores de 27,88 e 30,00 mm, e diâmetros internos de 26,44 e 28,22 mm, respectivamente.

A Tabela 3.1 apresenta o raio de cada uma das regiões do irradiador e do alvo de U-Ni cilíndrico.

Figura 3.4: Secção transversal horizontal do dispositivo de irradiação para o alvo de U-Ni com geometria cilíndrica.

Tabela 3.1 - Raio dos materiais dos alvo de U-Ni cilíndrico.

Raio	Diâmetro (cm)
AB	1,0000
AC	1,3220
AD	1,3940
AE	1,3960
AF	1,4095
AG	1,4110
AH	1,5000
AI	1,7500
AJ	1,9000
AK	2,2000
AL	3,8100

As Figuras 3.5 e 3.6 apresentam, respectivamente, o conjunto de cilindros concêntricos posicionados no Dispositivo para Irradiação de Miniplacas Combustíveis (DIM) e os mesmos fora do dispositivo.

Figura 3.5: Conjunto de cilindros concêntricos posicionados no Dispositivo para Irradiação de Miniplacas Combustíveis (DIM).

Figura 3.6: Conjunto de cilindros concêntricos.

3.1.3 U-Ni Placa

Os alvos de folha de urânio metálico tipo placa foram baseados nos alvos que foram estudados no reator de pesquisa do Paquistão e consistem de uma folha de urânio (19,99% ^{235}U) com uma espessura de $135\ \mu\text{m}$ envolvido por uma folha de níquel com $20\ \mu\text{m}$ de espessura e colocada entre duas placas de alumínio soldadas em todos os lados. Cada miniplaca de U-Ni possui uma massa de ^{235}U igual a 2,01 g. A geometria do alvo de U-Ni placa é mostrada nas Figuras 3.7 e 3.8. Essa geometria foi utilizada na modelagem dos alvos.

Figura 3.7: Meia espessura da placa de U-Ni e do canal de refrigeração.

Figura 3.8: Largura e altura das placas de U-Ni.

3.2 Análise dos Alvos para o Reator IEA-R1

3.2.1 Reator IEA-R1

O IEA-R1 é um reator de pesquisa do tipo piscina aberta e tem como refrigerante e moderador água leve desmineralizada e, berílio e grafite como refletores. O núcleo tem a forma de um paralelepípedo. Ele é formado por 25 elementos, sendo 20 EC padrão, 4 elementos combustíveis de controle de controle (ECT), 1 elemento irradiador central de Berílio, elementos para irradiação de amostras (irradiadores) e refletores, sendo que o número de irradiadores e refletores na placa matriz do mesmo varia de acordo com a configuração escolhida. No ano de 2007, houve a substituição de um dos trocadores de calor do Reator IEA-R1, o que possibilitou a sua operação com segurança até uma

potência de 5 MW. A Figura 3.9 apresenta uma representação esquemática do núcleo do reator IEA-R1 contendo 20 EC, 4 ECT, refletores e irradiadores na placa matriz do reator.

Figura 3.9: Representação esquemática do núcleo do reator IEA-R1.

Para simular os alvos no reator foi criado um núcleo fictício composto por 24 elementos de U_3Si_2-Al , sendo 4 ECT, com densidade de $1,2 \text{ gU/cm}^3$, um dispositivo de irradiação de Berílio (EIBE) na sua posição central e refletido com Berílio. Todos os elementos foram tomados como novos e a potência de operação adotada foi de 5 MW. As seções de choque de todos os elementos que compõem o núcleo do reator, incluindo os alvos, foram geradas com HAMMERTECHNION (Apêndice B). O CITATION (Apêndice B) foi usado para

fazer a modelagem 3D do núcleo e determinar parâmetros como: k-efetivo, o fluxo de nêutrons e a densidade de potência. O programa SCALE 6.0 (Apêndice B) foi usado para fazer o cálculo da queima dos alvos e determinar o inventário de nuclídeos gerados. Os alvos foram testados apenas na posição de irradiação de maior fluxo de nêutrons, posição central de irradiação, que possui um fluxo de $\approx 9,0 \cdot 10^{13}$ n/cm².s. Foi adotado o atual ciclo de operação do IEA-R1, 3 dias, para as simulações. A Figura 3.10 apresenta a posição central de irradiação para qual os alvos foram analisados. Somente os alvos de UAl₂-Al foram analisados para o reator IEA-R1.

3.2.2 Critérios e Limites de Projeto Termo-hidráulico

Critérios e limites de projeto são estabelecidos para combustíveis do tipo MTR (*Material Test Reactor*) de forma a não ocorrer uma mudança geométrica acentuada no elemento combustível e permitir o seu correto funcionamento durante o seu tempo de permanência no reator [10].

Para efetuar a análise termo-hidráulica do DIM foi adotada uma metodologia baseada no TECDOC 231 da IAEA [13]. Seguindo as orientações estabelecidas no *Safety Requirements N^o. NS-R-4* [14] os seguintes critérios são estabelecidos:

1. temperatura de saturação do refrigerante na posição de irradiação $< 114,2$ °C;
2. temperatura média na superfície do revestimento do combustível < 95 °C, temperatura acima da qual a probabilidade de corrosão no revestimento é alta;
3. temperatura máxima na superfície do revestimento do combustível inferior a temperatura de ONB (*Onset of Nucleate Boiling*);
4. velocidade de escoamento no canal de refrigeração inferior à velocidade crítica (15 m/s) de instabilidade mecânica da placa combustível;
5. fluxo de calor máximo inferior ao fluxo de calor para instabilidade de fluxo;
6. fluxo de calor máximo inferior ao fluxo de calor crítico (*Departure From Nucleate Boiling* - DNB).

Para esta avaliação, um estudo paramétrico foi desenvolvido com o programa MTRCR-IEAR1 (Apêndice B). Os cálculos foram feitos para a posição central de irradiação do

Figura 3.10: Núcleo do reator IEA-R1 - Desenho Esquemático Configuração 236.

núcleo do reator IEA-R1 e para a posição de irradiação periférica do núcleo do reator RMB. Foi avaliado neste estudo, a velocidade mínima necessária para resfriar as miniplacas combustíveis dentro do DIM sem comprometer os limites de segurança.

Os cálculos consideram que os alvos utilizados para a produção de ^{99}Mo permanecem poucos dias dentro do núcleo do reator, de forma que foi adotado como limite base de projeto termo-hidráulico para esta análise:

- a temperatura máxima na superfície do revestimento do combustível inferior à temperatura de ONB;
- a temperatura de saturação do refrigerante $< 114,2\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- a velocidade de escoamento no canal de refrigeração inferior à velocidade crítica de instabilidade mecânica da placa combustível (15 m/s).

Os demais critérios não se aplicam, pois como o tempo de irradiação será de poucos dias a chance de uma eventual corrosão são muito baixas e para evitar condições de instabilidade de fluxo e DNB a temperatura no revestimento deve estar abaixo da temperatura de ONB [10].

3.2.3 Cálculos Neutrônicos e Termo-hidráulicos dos Alvos de $\text{UAl}_2\text{-Al}$ para o IEA-R1

3.2.3.1 Cálculos Neutrônicos

Foram modeladas 10 miniplacas alvos de $\text{UAl}_2\text{-Al}$ em um dispositivo de irradiação (Figura 3.1) com geometria externa semelhante a um elemento combustível padrão deste reator, diferenciando-se internamente, onde foi alojado um estojo de alumínio no qual são posicionadas as 10 miniplacas para irradiação. As miniplacas foram modeladas com uma densidade de U de $2,91\text{ g/cm}^3$ e com um enriquecimento de 19,9% em ^{235}U . Cada miniplaca possui uma massa de U igual a 10,438 g (massa total de U igual a 104,38 g).

Foi adotado o atual regime de operação (três dias) do reator para a realização da simulação. No final da irradiação a atividade total obtida para o ^{99}Mo nas 10 placas de $\text{UAl}_2\text{-Al}$ foi de 1406,63 Ci, mas ainda são necessários mais 7 dias de resfriamento para iniciar-se o processo químico de separação, de forma que a quantidade final de ^{99}Mo para processamento e distribuição do ^{99}Tc cai para 240,48 Ci, quantidade essa não suficiente

para atender à demanda dos hospitais brasileiros. Também foi realizada uma simulação considerando o DIM com dois estojos iguais dispostos em dois andares (Figuras 3.11 e 3.12), cada um com 10 miniplacas de UAl_2-Al . A simulação demonstra que as 20 miniplacas juntas, após os 7 dias de resfriamento, iriam gerar 480 Ci de atividade final de ^{99}Mo , quantidade essa suficiente para atender a demanda atual dos hospitais brasileiros. Estudos mais aprofundados devem ser realizados, pois o reator IEA-R1 poderia ser um grande colaborador para produção nacional de radiofármacos.

Figura 3.11: Dois estojos iguais dispostos em dois andares.

Figura 3.12: Estojos posicionados no DIM.

3.2.3.2 Cálculos Termo-hidráulicos

Foram consideradas na simulação 10 miniplacas idênticas de $\text{UAl}_2\text{-Al}$. A Figura 3.2 apresenta a seção transversal do DIM com as dimensões dos canais modelados. O Apêndice C apresenta o input da modelagem no programa MTRCR-IEAR1.

Para avaliar as temperaturas atingidas nos alvos de $\text{UAl}_2\text{-Al}$ foram testadas velocidades entre 5 e 15 m/s de fluido refrigerante através do DIM. A Tabela 3.2 apresenta as temperaturas calculadas, no final do canal de refrigeração, para as diferentes velocidades do fluido refrigerante através do DIM no núcleo do reator IEA-R1. Para a velocidade de 5 m/s nenhum limite do projeto é ultrapassado. As temperaturas calculadas no revestimento estão abaixo do valor de 128,5 °C, indicando um escoamento monofásico através dos alvos. A Figura 3.13 demonstra que a temperatura no refrigerante está muito abaixo de < 114,2 °C (temperatura de saturação da água na posição de irradiação) [10].

A Tabela 3.2 também indica que mesmo para velocidades inferiores a 5 m/s (35 m³/h) são suficientes para refrigerar os alvos, de forma que não será necessário desviar uma quantidade significativa da vazão total de fluido refrigerante do núcleo do reator para refrigerar o DIM, ou seja, a adição do dispositivo com as miniplacas não prejudicará o resfriamento dos elementos combustíveis que compõem o núcleo, mas para evitar o desvio de vazão desnecessário do núcleo pelas miniplacas será necessário fabricar um restritor de

vazão de fluido refrigerante, a fim de manter a velocidade de refrigeração desejada no DIM.

Tabela 3.2 - Temperaturas obtidas nos alvos de UAl_2-Al em função da variação da velocidade para o IEA-R1.

Velocidade do refrigerante (m/s)	T_{ONB}	Temperatura no cerne dos alvos ($^{\circ}C$)	Temperatura no revestimento ($^{\circ}C$)	Temperatura no refrigerante ($^{\circ}C$)
5	128,5	111,2 0	99,06	45,00
6	128,5	103,20	91,07	44,48
7	128,5	97,38	85,21	44,11
8	128,5	92,89	80,71	43,84
9	128,5	89,32	77,14	43,63
10	128,5	86,42	74,24	43,46
11	128,5	85,15	72,98	43,39
12	128,5	82,93	70,75	43,27
13	128,5	81,04	68,86	43,16
14	128,5	79,40	67,23	43,08
15	128,5	77,98	65,80	43,00

Figura 3.13: Temperaturas calculadas nas miniplacas de UAl_2-Al em função da velocidade para o reator IEA-R1.

3.3 Análise dos Alvos para o Reator RMB

3.3.1 Reator RMB

Os alvos foram modelados e testados no RMB utilizando-se o núcleo do projeto conceitual inicial, o núcleo atual está completamente diferente devido às mudanças e melhorias ao longo do seu desenvolvimento. Neste, o RMB possui uma potência de 30 MW, configuração 5x6 com 2 irradiadores centrais e 28 elementos combustíveis do tipo MTR de U_3Si_2-Al novos com densidade de $1,9 \text{ gU/cm}^3$ e enriquecidos a 19,75% em ^{235}U . O núcleo do reator é refrigerado e moderado a água leve e utiliza água pesada e Berílio como refletores.

As seções de choque de todos os elementos que compõem o núcleo do reator, incluindo os alvos, foram gerados com HAMMERTECHNION. O CITATION foi usado para fazer a modelagem 3D do núcleo e determinar parâmetros como: k-efetivo, o fluxo de nêutrons e a densidade de potência. A modelagem do núcleo do reator, assim como as seções choque geradas para seus componentes, exceto os alvos, foram cedidas pela equipe de Física de Reatores do Centro de Engenharia Nuclear (CEN) do Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares (IPEN). O programa SCALE 6.0 foi usado para calcular a queima dos alvos e determinar o inventário de nuclídeos gerados. Os alvos foram testados apenas na posição de irradiação periférica do núcleo, refletor de água pesada (D_2O). Foi adotado um ciclo de operação de 7 dias para as simulações. Os três tipos de alvos (UAl_2-Al , U-Ni cilíndrico e U-Ni placa) foram analisados para o reator RMB.

3.3.2 Critérios e Limites de Projeto Termo-hidráulicos

Foram adotados os mesmo critérios e limites de projeto termo-hidráulicos descritos na seção 3.2.2.

3.3.3 Cálculos Neutrônicos e Termo-hidráulicos dos Alvos de UAl_2-Al para o RMB

3.3.3.1 Cálculos Neutrônicos

Foram modeladas 10 miniplacas alvos de UAl_2-Al no DIM. Os alvos foram simulados em uma posição periférica do núcleo, no refletor de água pesada. Os alvos foram modelados em um dispositivo de irradiação (Figura 3.2) com geometria externa semelhante a um elemento combustível padrão deste reator, diferenciando-se internamente, onde foi alojado um estojo

de alumínio no qual são posicionadas as 10 miniplacas para irradiação. As miniplacas foram modeladas com uma densidade U de $2,91\text{g/cm}^3$ e com um enriquecimento de 19,9% em ^{235}U . Cada miniplaca possui uma massa de U igual a 10,438 g (massa total de U igual a 104,38 g). A Figura 3.3 apresenta as dimensões das miniplacas modeladas.

Foi adotado um regime de operação do reator de 7 dias para a realização da simulação. No final da irradiação a atividade total obtida para o ^{99}Mo nas 10 placas de $\text{UAl}_2\text{-Al}$ foi de 2980,62 Ci, mas ainda são necessários mais 7 dias de resfriamento para iniciar-se o processo químico de separação, de forma que a quantidade final de ^{99}Mo para processamento e distribuição do ^{99}Tc cai para 509,57 Ci, quantidade essa suficiente para atender à demanda dos hospitais brasileiros.

3.3.3.2 Cálculos Termo-hidráulicos

Foram consideradas na simulação 10 miniplacas idênticas de $\text{UAl}_2\text{-Al}$. A Figura 3.2 apresenta a seção transversal do DIM com as dimensões dos canais modelados.

Para avaliar as temperaturas atingidas nos alvos de $\text{UAl}_2\text{-Al}$ foram testadas velocidades entre 5 e 15 m/s de fluido refrigerante através da DIM. A Tabela 3.3 apresenta as temperaturas calculadas, no final dos canal de refrigeração, para as diferentes velocidades do fluido refrigerante através do DIM colocado na posição periférica do núcleo do reator. A Tabela 3.3 demonstra que uma velocidade de 7 m/s é suficiente para refrigerar o alvo. Para esta velocidade nenhum limite do projeto é ultrapassado. As temperaturas calculadas no revestimento estão abaixo do valor de $134,7\text{ }^\circ\text{C}$, indicando um fluxo monofásico através dos alvos. A Figura 3.14 demonstra que a temperatura no refrigerante está muito abaixo de $< 114,2\text{ }^\circ\text{C}$ (temperatura de saturação da água) [10].

Tabela 3.3 - Temperaturas obtidas nos alvos de UAlx-Al em função da variação da velocidade para o RMB.

Velocidade do refrigerante (m/s)	T_{ONB}	Temperatura no cerne dos alvos ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura no revestimento ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura no refrigerante ($^{\circ}\text{C}$)
5	134,7	189,0	162,60	48,51
6	134,7	172,5	146,10	47,38
7	134,7	160,3	134,00	46,58
8	134,7	151,0	124,60	45,99
9	134,7	143,5	117,10	45,53
10	134,7	137,4	111,00	45,17
11	134,7	132,3	105,90	44,87
12	134,7	130,0	103,60	44,75
13	134,7	126,0	99,62	44,52
14	134,7	122,5	96,15	44,33
15	134,7	119,5	93,12	44,17

Figura 3.14: Temperaturas obtidas nas miniplacas de UAl₂-Al em função da velocidade para o reator RMB.

3.3.4 Cálculos Neutrônicos e Termo-hidráulicos do Alvo U-Ni Cilíndrico para o RMB

3.3.4.1 Cálculos Neutrônicos

O alvo de U-Ni com geometria cilíndrica foi simulado em uma posição periférica do núcleo, no refletor de água pesada. O alvo foi modelado em um dispositivo de irradiação (Figura 3.2) com geometria externa semelhante a um elemento combustível padrão deste reator, diferenciando-se internamente, onde foi alojado um estojo de alumínio no qual o cilindro é posicionado para a irradiação. O alvo foi modelado com uma densidade U de $19,05\text{g/cm}^3$ e com um enriquecimento de 19,9% em ^{235}U . A massa total de U no alvo é de 104,38 g.

Foi adotado um regime de operação do reator de 7 dias para a realização da simulação. No final da irradiação a atividade total obtida para o ^{99}Mo no alvo de U-Ni cilíndrico foi de 3166,6 Ci, mas ainda são necessários mais 7 dias de resfriamento para iniciar-se o processo químico de separação, de forma que a quantidade final de ^{99}Mo para processamento e distribuição do ^{99}Tc cai para 541,36 Ci, quantidade essa suficiente para atender à demanda dos hospitais brasileiros.

3.3.4.2 Cálculos Termo-hidráulicos

Para o cálculo das temperaturas no alvo de U-Ni cilíndrico foi utilizado o programa Ansys CFX[®] (Apêndice B). A densidade de potência, 25 kW/cm^3 calculada com o CITATION, foi utilizada como dado de entrada para se determinar as temperaturas no alvo. A Tabela 3.4 apresenta as temperaturas calculadas, no final do canal de refrigeração, para as diferentes velocidades do fluido refrigerante através do irradiador colocado em uma posição periférica do núcleo do reator, no tanque de água pesada. A Tabela 3.4 demonstra que uma velocidade de 8 m/s é suficiente para refrigerar o alvo. Para esta velocidade nenhum limite do projeto é ultrapassado. As temperaturas calculadas no tubo de alumínio, Figura 3.15, estão abaixo do valor de $132\text{ }^\circ\text{C}$, indicando um escoamento monofásico através dos canais.

Tabela 3.4 - Temperaturas obtidas no alvo de U-Ni cilíndrico em função da variação da velocidade para o RMB.

Velocidade do refrigerante (m/s)	Temperatura no revestimento (°C)
5	166
6	149
7	137
8	127
9	119
10	113
11	107
12	103
13	99
14	95
15	92
16	90

Figura 3.15: Temperaturas obtidas no alvo de U-Ni cilíndrico em função da velocidade para o reator RMB.

3.3.5 Cálculos Neutrônicos e Termo-hidráulicos dos Alvos de U-Ni Placa para o RMB

3.3.5.1 Cálculos Neutrônicos

Foram modeladas 10 placas alvos de U-Ni. Os alvos foram modelados em um dispositivo de irradiação (Figura 3.2) com geometria externa semelhante a um elemento combustível padrão deste reator, diferenciando-se internamente, onde foi alojado um estojo de alumínio no qual são posicionadas as 10 miniplacas para irradiação. Os alvos foram modelados e simulados em uma posição periférica do núcleo, no refletor de água pesada. As miniplacas foram modeladas com uma densidade U de $19,05\text{g/cm}^3$ e com um enriquecimento de 19,9% em ^{235}U . Cada miniplaca possui uma massa de U igual a 10,438 g (massa total de U igual a 104,38 g).

Foi adotado um regime de operação do reator de 7 dias para a realização da simulação. No final da irradiação a atividade total obtida para o ^{99}Mo nas 10 placas de U-Ni foi de 3495,23 Ci, mas ainda são necessários mais 7 dias de resfriamento para iniciar-se o processo químico de separação, de forma que a quantidade final de ^{99}Mo para processamento e distribuição do ^{99}Tc cai para 597,5 Ci, quantidade essa suficiente para atender à demanda dos hospitais brasileiros.

3.3.5.2 Cálculos Termo-hidráulicos

Foram consideradas na simulação 10 miniplacas idênticas de U-Ni. A Figura 3.2 apresenta a seção transversal do DIM com as dimensões dos canais modelados.

Para avaliar as temperaturas atingidas nos alvos de U-Ni foram testadas velocidades entre 5 e 15 m/s de fluido refrigerante através da DIM. A Tabela 3.5 apresenta as temperaturas calculadas, no final do canal de refrigeração, para as diferentes velocidades do fluido refrigerante através do DIM colocado na posição periférica do núcleo do reator. A Tabela 3.5 demonstra que uma velocidade de 9 m/s é suficiente para refrigerar os alvos. Para esta velocidade nenhum limite do projeto é ultrapassado. As temperaturas calculadas no revestimento estão abaixo do valor de $137\text{ }^{\circ}\text{C}$, indicando um escoamento monofásico através dos alvos. A Figura 3.16 demonstra que a temperatura no refrigerante está muito abaixo de $< 114,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura de saturação da água) [10].

Tabela 3.5 - Temperaturas obtidas nos alvos de U-Ni placa em função da variação da velocidade para o RMB.

Velocidade do refrigerante (m/s)	T_{ONB}	Temperatura no cerne dos alvos ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura no revestimento ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura no refrigerante($^{\circ}\text{C}$)
5	137	209,1	191,4	49,01
6	137	188,8	171,1	47,79
7	137	173,7	156,1	46,93
8	137	162,2	144,5	46,29
9	137	152,9	135,2	45,80
10	137	145,3	127,7	45,41
11	137	139,0	121,4	45,10
11	137	136,2	118,6	44,96
12	137	131,3	113,6	44,72
13	137	127,0	109,3	44,51
15	137	113,2	105,6	44,33

Figura 3.16: Temperaturas obtidas nas miniplacas de U-Ni em função da velocidade para o reator RMB.

3.4 Verificação da Produção de ^{99}Mo nos Alvos

Para se verificar a produção de ^{99}Mo calculado com o SCALE 6.0 em cada conjunto de alvos utilizou-se a equação 3.1.

$$A = \frac{N * (\sigma_1\phi_1 + \sigma_2\phi_2 + \sigma_3\phi_3 + \sigma_4\phi_4) * V * y * (1 - e^{-\lambda t})}{3,7 * 10^{10}} \quad (3.1)$$

sendo,

- A é a atividade final do nuclídeo em Ci ;
- N é a concentração de ^{235}U no alvo em átomos/ cm^3 ;
- σ_i é seção de choque microscópica de fissão do ^{235}U em 10^{-24} cm^2 ;
- ϕ_i é o fluxo em cada grupo (2 térmicos e 2 rápidos) em nêutron/ cm^2s ;
- V é o volume homogenizado modelado no CITATION em cm^3 ;
- y é o yield de fissão para o ^{99}Mo ;
- λ é a constante de decaimento do ^{99}Mo em $1/\text{s}$; e
- t é o tempo de irradiação dos alvos em s .

A partir da Equação 3.1 e das seções de choque microscópicas de fissão produzidas e colapsados em 4 grupos pelo HAMMERTECHNION, foi possível calcular os resultados esperados e compará-los aos resultados gerados com o SCALE 6.0. A Tabela 3.6 demonstra que os resultados obtidos pelos programas apresentam aproximadamente a mesma razão. A Figura 3.17 demonstra que o perfil da atividade para os casos simulados apresentam a mesma tendência, permitindo verificar a consistência do método utilizado.

Tabela 3.6 - Valores calculados com a Equação 3.1 e valores simulados com SCALE 6.0 para a atividade de ^{99}Mo .

Caso	SCALE 6.0	CITATION	Razão
1 - UAl_2 IEA-R1	1406,63	995,85	0,708
2 - UAl_2 RMB	2980,62	4137,10	0,720
3 - U-NI Cilíndrico RMB	3166,60	4432,90	0,714
4 - U-NI Placa RMB	3495,23	4386,30	0,797

Figura 3.17: Comparação entre as atividades de ^{99}Mo calculadas com Equação 3.1 e as simuladas com o SCALE 6.0.

3.5 Análise dos Cálculos

A partir dos cálculos neutrônicos apresentados, podemos concluir que o reator IEA-R1 poderia ser utilizado na produção de ^{99}Mo nacional desde que fosse operado a 5 MW e o DIM reprojetoado para acoplar mais miniplacas de $\text{UAl}_2\text{-Al}$. As análises termo-hidráulicas demonstram que nenhum limite do projeto é ultrapassado. As análises neutrônicas realizadas para o RMB demonstram que os três tipos de alvo ($\text{UAl}_2\text{-Al}$, U-Ni cilíndrico e U-Ni placa) contendo a mesma massa total de ^{235}U (20,1 g) e sob as mesmas condições de irradiação atenderiam a demanda dos hospitais brasileiros. As análises termo-hidráulicas demonstram que será necessário uma velocidade mínima de 7 m/s para o UAl_2 , de 8 m/s para o alvo de U-Ni cilíndrico e de 9 m/s para o alvo de U-Ni placa para que nenhum limite de projeto seja ultrapassado. Após essas análises foi decidido utilizar o alvo de $\text{UAl}_2\text{-Al}$

para a continuidade desta pesquisa, pois o ainda Brasil não domina a fabricação de combustíveis tipo U-Ni, de forma que os experimentos neutrônicos foram realizados apenas com os alvos de UAl.

Validação das Análise Neutrônica e Termo-hidráulica Através de Experimentos

4.1 Verificação Térmica e Hidrodinâmica

Foram realizadas análises experimentais e numéricas do conjunto a fim de verificar as condições hidrodinâmicas e térmicas do dispositivo de irradiação de miniplacas.

4.1.1 Aparato Experimental

O Centro de Engenharia Nuclear (CEN) possui uma bancada experimental termo-hidráulica (Bancada de Aferição de Vazão - BAV) que foi utilizada para se determinar a perda de carga no DIM e compara-lá com as simulações realizadas no software Ansys CFX[®]. O DIM foi testado em duas situações:

1. a primeira sem o estojo;
2. a segunda com o estojo contendo as 10 miniplacas.

A bancada é composta por um duto de seção circular de alumínio, Figura 4.1, que possui aproximadamente 2,5 m de altura e 40 cm de diâmetro, onde o DIM é fixado internamente. A instalação possui dois medidores de pressão:

1. Validyne Modelo DP15 calibrado para 2000 mmH₂O, n°. série 504701, com um Demodulador Validyne modelo CD15, n°. série 118427;
2. Validyne Modelo DP15 calibrado para 5000 mmH₂O, n°. série 506319, com um Demodulador Validyne modelo CD15, n°. série 118466;

Um para medida de pressão diferencial na placa de orifício (5000 mmH₂O) e outro para medir o diferencial de pressão através do DIM. O circuito que se estabelece é completamente preenchido por água e recalcado por uma bomba (Bomba MARK modelo DLC-9, 7,5 CV, n.º. série 30022240 com motor WEG). A vazão é determinada por uma placa de orifício acoplada ao Validyne de 5000 mmH₂O, Figura 4.3. O medidor de pressão foi ajustado para trabalhar a 5000 mmH₂O (0-10V) e os transdutores de pressão para 2000 mmH₂O (0-10V). O sistema também possui um reservatório que contém água para realimentação do sistema. A Figura 4.4 apresenta um desenho esquemático do aparato experimental.

Para a placa de orifício a equação que relaciona o diferencial de pressão e vazão é indicada pela Equação 4.1 calibrada pela Tabela 4.1.

$$DP = 50,4265 * \dot{m}^2 \quad (4.1)$$

sendo,

- DP é a queda de pressão na placa de orifício (mmH₂O);
- 50,4265 é o coeficiente de perda de carga na placa de orifício (mmH₂O/(kg/s)²); e
- m a vazão mássica (kg/s).

Figura 4.1: Tubo de alumínio da bancada termo-hidráulica.

Figura 4.2: Bomba da bancada termo-hidráulica.

Figura 4.3: Placa de Orifício da bancada termo-hidráulica e Validyne.

Figura 4.4: Desenho esquemático do aparato experimental.

Figura 4.5: Demoduladores dos Validynes e multímetro Digital.

Tabela 4.1 - Curva experimental da placa de orifício.

ΔP (mmH ₂ O)	Tensão (V)	Vazão Mássica (kg/s)
97,1488	0,1943	1,3880
218,8640	0,4377	2,0833
388,8750	0,7770	2,7770
607,9500	1,2150	3,4720
875,4320	1,7500	4,1666
1191,5970	2,3830	4,8611
1556,0620	3,1120	5,5550
2004,9550	4,0100	6,3055

Utilizando-se a Equação 4.1 e a curva experimental da placa de orifício foi possível determinar a vazão no sistema e, juntamente com o diferencial de pressão medido no DIM, traçar a curva ($\Delta P \times$ Vazão) para determinar o coeficiente de perda de carga no DIM para duas situações acima descritas. Foram feitas 8 medidas de vazões entre 1,388 e 6,0355 kg/s. Para cada uma dessas 8 vazões foram feitas 5 medidas experimentais e a média aritmética calculada para cada uma. A Tabela 4.2 apresenta a vazão calculada utilizando-se a placa

de orifício para o DIM composto com o estojo e as 10 miniplacas. A Tabela 4.3 apresenta a vazão calculada utilizando-se a placa de orifício para o DIM sem o estojo.

Tabela 4.2 - Vazão calculada para a placa de orifício com o DIM composto com o estojo e as 10 miniplacas.

Tensão Média (V)	ΔP na Placa (Pa)	Vazão Calculada (kg/s)	ΔP no DIM (Pa)
0,202	990,422	1,4152	678,586
0,422	2069,099	2,0455	1455,234
0,784	3844,014	2,7881	2502,532
1,204	5903,308	3,4551	3895,006
1,706	8364,654	4,1128	5001,141
2,378	11659,524	4,8557	6981,985
3,158	15483,926	5,5957	9394,301
3,946	19347,553	6,2550	11830,151

Tabela 4.3 - Vazão calculada para a placa de orifício com o DIM sem o estojo.

Tensão Média (V)	ΔP na Placa (Pa)	Vazão Calculada (kg/s)	ΔP no DIM (Pa)
0,178	872,748	1,3284	372,634
0,434	2127,930	2,0744	1227,731
0,774	3794,980	2,7702	2082,828
1,192	5844,470	3,4378	3895,006
1,728	8472,520	4,1392	5020,753
2,346	11502,620	4,8229	6762,328
3,024	14826,910	5,4757	9072,659
3,724	18259,060	6,0765	9888,531

A Figura 4.6 apresenta a curva de perda de carga em função da vazão (ΔP x Vazão), para o DIM composto com o estojo e as 10 miniplacas e a Figura 4.7 sem estojo. A análise das Figuras 4.6 e 4.7 indicam um comportamento parabólico com concavidade da parábola voltada para cima [16] característica esperada para dispositivos que causam perda de carga localizada.

Figura 4.6: Gráfico ΔP x Vazão experimental para o DIM composto com o estojo e as 10 miniplacas.

Figura 4.7: Gráfico ΔP x Vazão experimental para o DIM sem o estojo e as 10 miniplacas.

Os cálculos foram realizados com unidades no sistema internacional (convertendo-se os diferenciais de pressão de mmH₂O para Pascal). O coeficiente de perda de carga da placa de orifício é de 494,5 Pa/(kg/s)². O coeficiente de perda de carga encontrado para o DIM composto com o estojo e as 10 miniplacas é igual a 303 +/- 4 Pa/(kg/s)² com chi-quadrado igual a 0,9940489, para o DIM sem o estojo o coeficiente de perda de carga foi igual a 285 +/- 4 Pa/(kg/s)² com o chi-quadrado igual a 0,99703. Os coeficientes foram obtidos em função de ajuste de curva parabólica aos dados experimentais utilizando-se o programa QTIPLLOT.

Utilizando-se o coeficientes obtidos acima, os diferenciais de pressão calculados e a Equação 4.1 foi possível calcular as vazões no DIM. A Tabela 4.4 apresenta a vazão calculada utilizando-se o coeficiente de perda de carga obtido para o DIM composto com o estojo e as 10 miniplacas. A Tabela 4.5 apresenta a vazão calculada utilizando-se o coeficiente de perda de carga obtido para o DIM sem o estojo.

Tabela 4.4 - Vazão calculada com o coeficiente de perda de carga obtido para o DIM composto com o estojo e as 10 miniplacas.

Tensão Média (V)	ΔP no DIM (Pa)	Vazão Calculada (kg/s)
0,346	678,586	1,4955
0,742	1455,234	2,1901
1,276	2502,532	2,8720
1,986	3895,006	3,5831
2,560	5020,753	4,0681
3,560	6981,985	4,7973
4,790	9394,301	5,5646
6,032	11830,151	6,2445

Tabela 4.5 - Vazão calculada com o coeficiente de perda de carga obtido para o DIM sem o estojo e as 10 miniplacas.

Tensão Média (V)	ΔP no DIM (Pa)	Vazão Calculada (kg/s)
0,190	372,634	1,1426
0,626	1227,731	2,0740
1,062	2082,828	2,7013
1,746	3424,311	3,4637
2,550	5001,141	4,1859
3,448	6762,328	4,8675
4,626	9072,659	5,6380
5,042	9888,531	5,8860

As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os desvios entre as medidas e a utilização dos coeficientes ajustados, respectivamente, com e sem estojo. O desvio é calculado conforme Equação 4.2.

$$Desvio(\%) = \left(\frac{\dot{m}_{Exp} - \dot{m}_{A_j}}{\dot{m}_{Exp}} \right) \cdot 100 \quad (4.2)$$

sendo,

- $\dot{m}_{Exp}$ vazão em massa obtida pelo experimento;
- $\dot{m}_{A_j}$ vazão em massa obtida pelo ajuste das curvas.

Tabela 4.6 - Desvio relativo entre as vazões medidas e calculadas para o DIM composto com estojo mais 10 as miniplacas.

Medidas	Vazão Experimental (kg/s)	Vazão Calculada (kg/s)	Desvio Relativo (%)
1	1,415	1,495	5,653
2	2,045	2,190	7,090
3	2,788	2,872	3,013
4	3,455	3,583	3,704
5	4,112	4,068	1,070
6	4,855	4,797	1,194
7	5,595	5,564	0,554
8	6,255	6,244	0,175

Tabela 4.7 - Desvio relativo entre as vazões medidas e calculadas para o DIM sem o estojo e as 10 as miniplacas.

Medidas	Vazão Experimental (kg/s)	Vazão Calculada (kg/s)	Desvio Relativo (%)
1	1,3280	1,1420	13,9920
2	2,0744	2,0740	0,0200
3	2,7700	2,7010	2,4870
4	3,4370	3,4630	0,7523
5	4,1390	4,1850	1,1270
6	4,8220	4,8670	0,9230
7	5,4750	5,6380	2,9634
8	6,0760	5,8860	3,1340

Analisando os desvios indicados nas Tabelas 4.4 e 4.5 verificou-se que os maiores desvios ocorrem para as menores vazões, sendo o desvio máximo obtido na condição sem estojo de valor igual a 13,992%. Como se sabe [16] para vazões relativamente pequenas os efeitos viscosos no fluido são predominantes, nestas condições a estabilidade do coeficiente obtido sofre alteração significativa (não sendo uma constante), desta forma, justificando os desvios relativamente altos para as menores vazões. A medida que a vazão aumenta os efeitos inerciais no fluido são predominantes e o coeficiente torna-se de fato uma constante, sendo assim, o desvio obtido para as demais vazões diminui (tornando-se da ordem de 3%).

4.1.2 Cálculo da Vazão no DIM para o Reator IEA-R1

Foi realizado em 05/06/2007 pelo CEN um experimento de Medida de Vazão no Núcleo do Reator IEA-R1 para verificação da vazão que passa através dos Elementos Combustíveis (EC) em função da vazão total no circuito primário do reator [20]. O elemento DMPV-01 (Elemento Instrumentado para Medir Vazão no Núcleo do Reator IEA-R1) foi instalado na posição 64 do núcleo com configuração n°. 226, Figura 4.8, do reator IEA-R1 entre dois elementos combustíveis de controle e o circuito primário foi alinhado para operar com o novo trocador de calor (IESA). As medidas foram realizadas em apenas uma posição do núcleo (posição 64) devido ao fato constatado em medidas anteriores com o DMPV-01 de que a distribuição de vazão no núcleo ser praticamente uniforme.

01 $\Delta P_{\text{núcleo}}$	02 TD	03 TD	04 TD	05 TD	06 TD	07 TD	08 TS
11 TS	12 TS	13 EIRA	14 EIRA	15 TS	16 G1	17 TS	18 CF-1
21 GR	22 EIRA	23 GR	24 EIRA	25 GR	26 GR	27 GR	28 GR
31 EIS	32 EIS	33 Be	34 EIRA	35 Be	36 EIRA	37 Be	38 Be
41 EIS	42 EIS	43 EC 184	44 EC 178	45 EC 185	46 EC 177	47 EC 183	48 Be
51 GR	52 Be EI BR A	53 EC 195	54 BOC 181	55 EC 186	56 BOC 198	57 EC 188	58 Be EI F
61 LIN	62 Be	63 EC 193	64 EC 172	65 EIEE ○	66 EC 173	67 EC 192	68 Be
71 GR	72 Be	73 EC 196	74 BOC 199	75 EC 187	76 BOC 182	77 EC 194	78 Be EI BR A
81 S2	82 Be	83 EC 197	84 EC 176	85 EC 191	86 EC 174	87 EC 200	88 Be
91 GR	92 GR	93 GR	94 GR	95 GR	96 GR	97 GR	98 GR

Figura 4.8: Configuração 226 de operação do núcleo do reator IEA-R1.

Foram realizadas 10 medidas em condições de estado estacionário, com o circuito primário operando com vazões entre 2700 gpm ($613 \text{ m}^3/\text{h}$) e 3600 gpm ($818 \text{ m}^3/\text{h}$) e incrementos de 100 gpm ($22,7 \text{ m}^3/\text{h}$) entre cada medida. Para cada uma das medidas foram registrados 5 valores, para cálculos estatísticos. Um multímetro digital HP 3457A com recursos estatísticos foi utilizado para registrar os valores de tensão do TPD do DMPV-01, obtendo médias e desvios padrões num intervalo aproximado de 1 minuto, equivalente a um número de amostras da ordem de 150. Paralelamente às medidas com o DMPV-01, foram também

registrados os valores de tensão do painel de controle do reator referentes ao $\Delta P_{núcleo}$. Estes valores são utilizados para comparação com aqueles obtidos com o DMPV-01. A tensão medida no TPD do DMPV-01 para vazão zero no circuito primário foi $V = 1,0015V$ e no TPD do $\Delta P_{núcleo}$ para vazão zero foi $V = 0,974 V$.

A Figura 4.9 mostra o comportamento da queda de pressão $\Delta P_{DMPV-01}$ e da queda de pressão no núcleo medida pelo medidor de $\Delta P_{núcleo}$ instalado no reator IEA-R1 em função da vazão no circuito primário. Utilizando a Equação 4.1, o coeficiente de perda de carga encontrado através dos experimentos para o DIM composto com o estojo e as 10 miniplacas ($303 \pm 4 \text{ Pa}/(\text{kg/s})^2$) e os dados da Figura 4.9 foi possível calcular a vazão que passará através no DIM caso ele seja colocado no reator. Atualmente a vazão do reator IEA-R1 é de 3400 gpm, para essa vazão pode-se notar através do gráfico que a perda de carga no núcleo é de 900 mmH₂O (8825,742 Pa). Substituindo-se o valor da perda de carga no núcleo e o coeficiente de perda de carga encontrado para o DIM na referida equação obtemos uma vazão de 19,5261 m³/h (velocidade = 2,835 m/s).

Figura 4.9: Queda de pressão $\Delta P_{DMPV-01}$ e $\Delta P_{núcleo}$ versus vazão no circuito primário do IEA-R1.

Foi realizada uma simulação com o programa MTRCR-IEAR1 para se determinar as

temperaturas nas miniplacas para a vazão acima. Foi utilizado o input descrito no Apêndice C, mas com a velocidade variando de 2.835 a 5.085 m/s. Foram adotados os mesmos critérios de projeto descritos na seção 3.1. Para a referida vazão a temperatura no revestimento ficará um pouco acima da temperatura de ONB que é de 128,5 °C para este caso, de forma que será necessário uma vazão de no mínimo 20,24 m³/h (velocidade = 3,085 m/s) para que nenhum limite de projeto seja ultrapassado. A Tabela 4.8 apresenta as temperaturas calculadas para as diferentes velocidades do fluido refrigerante através do DIM no núcleo do reator IEA-R1.

Tabela 4.8 - Temperaturas obtidas nos alvos de UAl₂-Al em função da variação da velocidade para o IEA-R1.

Velocidade do refrigerante (m/s)	T _{ONB}	Temperatura no cerne dos alvos (°C)	Temperatura no revestimento (°C)	Temperatura no refrigerante (°C)	Vazão (m ³ /h)
2,835	128,5	143,1	131,0	47,3	19,52
3,085	128,5	137,5	125,3	46,87	21,24
3,335	128,5	132,6	120,4	46,50	22,97
3,585	128,5	128,3	116,1	46,19	24,69
3,835	128,5	124,5	112,3	45,91	26,41
4,085	128,5	121,1	108,9	45,67	28,13
4,335	128,5	118,0	105,9	45,46	29,85
4,585	128,5	115,3	103,1	45,27	31,57
4,835	128,5	112,8	100,6	45,1 0	33,30
5,085	128,5	110,5	98,31	44,95	35,02

4.1.3 Modelo Numérico Tridimensional

O modelo numérico tridimensional em regime permanente foi elaborado utilizando-se o software comercial de mecânica dos fluidos computacional (Ansys CFX[®]). Que dentre outras vantagens não requer que seja validado o método de solução das equações diferenciais (testes que normalmente demandam exagerado tempo e comparação com soluções analíticas). O software utiliza o método dos volumes finitos aplicado a uma malha de elementos tetraédricos e prismáticos não estruturada. Um total de três modelos foram construídos, sendo dois destes apenas simulações hidrodinâmicas (com e sem estojo) para comparação com os experimentos realizados e outro (com estojo e miniplacas) que levam em considera-

ção a hidrodinâmica e a transferência de calor. Para o último caso as simulações possuem o objetivo de extrapolação para a determinação das temperaturas na superfície do elemento combustível.

A geometria para as condições com e sem estojo, seja para a condição com ou sem transferência de calor, são exatamente as mesmas. A Figura 4.10 indica a geometria do elemento em corte com miniplacas e estojo (a) e sem estojo (b).

Figura 4.10: Geometria do elemento em corte com miniplacas e estojo (a) e sem estojo (b).

O modelo matemático considera como simplificação geométrica um quarto de simetria axial do domínio computacional. A Figura 4.11 apresenta a simplificação geométrica para a condição com estojo e miniplacas (a) e sem estojo (b).

Figura 4.11: Simplificação geométrica para a condição com estojo e miniplacas (a) e sem estojo (b).

4.1.3.1 Discretização Espacial

Devido a utilização do método dos volumes finitos há necessidade de discretização espacial do domínio computacional. Entretanto, tal procedimento introduz erros. Quanto maior for o tamanho do elemento utilizado piores serão suas respostas, e desta forma obtendo apenas uma característica média do escoamento em uma determinada posição. Tal comportamento não é desejável uma vez que se está realizando uma análise tridimensional. Como se sabe a quantidade de elementos necessária (ou dimensão adequada dos elementos) para uma simulação não é determinada pelo pesquisador mas sim pelo problema. Desta forma optou-se por utilizar a metodologia proposta por Stern que propõe um incremento da quantidade de elementos em progressão geométrica com razão de raiz de dois para o número de elementos da malha entre uma nova simulação e a anteriormente obtida considerando-se as mesmas condições de contorno. Este procedimento é realizado até que não seja verificado variação significativa das propriedades e grandezas envolvidas e desta forma a discretização é dita como independente dos resultados.

A Figura 4.12 apresenta o último passo de refinamento de malha para as condições

com estojo e miniplacas (a) que contém aproximadamente 7,2 milhões de elementos e sem estojo (b) contendo 5,4 milhões de elementos. Também devido a grande variação das propriedades e grandezas nas regiões próximas às paredes, há necessidade de utilização de discretização relativamente mais comportada, desta forma, foram utilizados elementos prismáticos perpendiculares a parede com taxa de crescimento entre camadas de 1,2 e um total de 15 camadas com o objetivo de capturar adequadamente os fenômenos de camada limite hidrodinâmica e térmica (quando houver transferência de calor).

Figura 4.12: Refinamento de malha para as condições com estojo e miniplacas (a) e sem estojo (b).

4.1.3.2 Condições de Contorno - Modelos Hidrodinâmicos

Como condição de contorno para os modelos hidrodinâmicos é assumido:

- i Escoamento isotérmico de água a 42°C;
- ii Fluido newtoniano;
- iii Hipótese de *stokes*;
- iv Vazão em massa de entrada variando de 1,5 kg/s a 6 kg/s;
- v Pressão de saída igual a zero (escala efetiva);
- vi Um quarto de simetria axial;
- vii Princípio da aderência nas regiões de parede;
- viii Rugosidade média da parede de 0,1 mm equivalente ao acabamento de usinagem;
- ix Para o tratamento da turbulência é utilizado o modelo de duas equações $k-\epsilon$ [18,19].

Para o modelo as equações de conservação são resolvidas considerando expansão em série de Taylor de segunda ordem e resíduo médio quadrático máximo inferior a 1.10^{-5} para todas as grandezas envolvidas (pressão e velocidade nas três direções).

4.1.3.3 Resultados Parciais - Modelos Hidrodinâmicos

Do mesmo modo como realizado para o experimento, foram determinadas os coeficientes de perda de carga para as duas condições: com estojo e miniplacas ($297 \text{ Pa}/(\text{kg/s})^2$) e sem estojo ($274 \text{ Pa}/(\text{kg/s})^2$). Resultando em um desvio de 1,98% em relação ao obtido pelo experimento para a condição com estojo e miniplacas e de 3,86% para a condição sem estojo. A Figura 4.13 apresenta a curva de perda de carga em função da vazão ($\Delta P \times \text{Vazão}$), para o DIM composto com o estojo e as 10 miniplacas e a Figura 4.14 sem estojo.

Figura 4.13: Gráfico ΔP x Vazão simulado com o Programa CFX para o DIM composto com o estojo e as 10 miniplacas.

Figura 4.14: Gráfico ΔP x Vazão simulado com o Programa CFX para o DIM sem o estojo.

Como a simulação numérica é tridimensional é possível visualizar a dinâmica do escoamento. A Figura 4.15 mostra um mapa de cores indicando a pressão na região de simetria e também em um detalhe da região das miniplacas para o DIM com estojo e as 10 miniplacas considerando vazão em massa de 6 kg/s. Na Figura 4.15 é possível verificar o aumento de pressão em função da coordenada z indicando coerência nos resultados obtidos.

Figura 4.15: Pressão na região de simetria.

As vazões nos canais não são idênticas, fato devido ao perfil de velocidades que se estabelece imediatamente antes de atravessar as placas. Este comportamento pode ser observado pelo mapa de cores indicando velocidade na seção de simetria do canal, Figura 4.16, condição correspondente a vazão em massa de 6 kg/s. Os canais das placas mais próximas às paredes do elemento combustível possuirão vazão inferior aos canais centrais (todos os canais possuem a mesma seção transversal). A Figura 4.17 apresenta os canais internos e adjacentes à parede do elemento combustível. A variação de vazão em massa (máxima) nos canais internos e nos canais adjacentes a parede do elemento combustível é

indicada na Tabela 4.9. A Figura 4.18 apresenta variação de vazão em massa nos canais.

Figura 4.16: Mapa de cores indicando velocidade na seção de simetria do canal.

Figura 4.17: Canais internos e adjacentes à parede do elemento combustível.

Tabela 4.9 - Variação de vazão em massa (máxima) nos canais internos e nos canais adjacentes a parede do elemento combustível.

Nº.	Vazão em Massa por canal [kg/s]	Desvio em relação ao canal de maior vazão (%)
1	0,488	14,3
2	0,553	3,0
3	0,552	3,2
4	0,555	2,7
5	0,569	0,2
6	0,570	0,0
7	0,569	0,2
8	0,555	2,7
9	0,552	3,2
10	0,553	3,0
11	0,488	14,3

Figura 4.18: Variação de vazão em massa nos canais.

4.1.3.4 Condições de Contorno - Modelo Térmico

As condições de contorno utilizadas para o modelo térmico são semelhantes as do modelo hidrodinâmico, entretanto, foi assumido que a temperatura de entrada da água é de 42 °C (condição mais crítica de funcionamento, set-point de desligamento do reator IEA-R1), propriedades termodinâmicas corrigidas em função da temperatura e pressão, transferência de calor e distribuição de fluxo de calor na direção axial (eixo z) conforme indicado pelo gráfico na Figura 4.19.

As vazões em massa das simulações numéricas variam de 9,5 kg/s até 28,6 kg/s, o que corresponde a velocidade média da placa de 5 a 15 m/s do MTRCR-IEAR1.

Figura 4.19: Distribuição de fluxo de calor na direção axial (eixo z).

4.1.3.5 Resultados Parciais - Modelo Térmico

A Tabela 4.10 apresenta o desvio relativo entre as temperaturas calculadas pelos programas CFX e MTRCR-IEAR1 no revestimento das miniplacas de $\text{UAl}_2\text{-Al}$ para o reator IEA-R1. A Tabela demonstra uma diferença de até 16% entre os resultados dos programas, isso ocorre porque o CFX está subestimando os valores de temperatura, pois os coeficientes de transferência de calor não são estimados por correlações empíricas, e o MTRCR-IEAR1

superestima os valores de temperatura por ser mais conservativo. A Figura 4.20 apresenta o mapa de cores indicando a temperatura na região de simetria das miniplacas. A Figura 4.21 apresenta as temperaturas calculadas pelos programas CFX e MTRCR-IEAR1 no revestimento das miniplacas de UAl_2 -Al para o reator IEA-R1.

Tabela 4.10 - Desvio relativo entre as temperaturas calculadas pelos programas CFX e MTRCR-IEAR1.

Velocidade do refrigerante (m/s)	Temperatura no revestimento (°C) (CFX)	Temperatura no revestimento (°C) MTRCR-IEAR1	Desvio (%)
5,00	98,02	99,06	1,1
5,526	90,20	94,73	5,0
6,053	84,59	91,07	7,7
6,579	80,18	87,93	9,7
7,105	76,64	85,21	11,2
7,632	73,72	82,82	12,3
8,158	71,27	80,71	13,2
8,684	69,18	78,83	13,9
9,211	67,38	77,14	14,5
9,737	65,81	75,62	14,9
10,26	64,43	74,24	15,2
10,79	63,20	72,98	15,5
11,32	62,10	71,82	15,7
11,84	61,11	70,75	15,8
12,37	60,22	69,77	15,9
12,89	59,41	68,86	15,9
13,42	58,67	68,02	15,9
13,95	57,99	67,23	15,9
14,47	57,37	66,49	15,9
15,00	56,79	65,8 0	15,9

Figura 4.20: Mapa de cores indicando a temperatura na região de simetria das miniplacas.

Figura 4.21: Temperaturas calculadas pelos programas CFX e MTRCR-IEAR1 no revestimento das miniplacas.

4.2 Verificação Neutrônica

4.2.1 Reator IPEN/MB-01

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 de 100 watts [21].

O núcleo do reator IPEN/MB-01 possui uma grade espaçadora na qual são inseridas varetas combustíveis, barras de controle (BC-1 e BC-2) e barras de segurança (BS-1 e BS-2) possibilitando a montagem de diferentes arranjos críticos. Para tal, a placa matriz do núcleo do reator possui 900 furos espaçados entre si por 15 mm (*pitch*), em um arranjo

ordenado de 30 x 30. Nesta placa matriz são montados arranjos críticos retangulares, quadrados e cilindrizados. A configuração padrão tem a forma de paralelepípedo com dimensões ativas de 39 x 42 x 54,84 cm, sendo constituído de um arranjo de 28 x 26 varetas, das quais 680 são varetas combustíveis e 48 são tubos guias, destinados à inserção das varetas de controle/segurança, responsáveis pelo controle da reação em cadeia e desligamento do reator [21]. A Figura 4.22 apresenta a vista superior do núcleo do reator com a configuração padrão retangular.

Figura 4.22: Vista do núcleo: configuração retangular do reator IPEN/MB-01.

4.2.2 Aparato Experimental

Para se validar as metodologias utilizadas nas análises neutrônicas do alvo foram propostos experimentos no reator IPEN/MB-01. Para isso foi construída uma caixa refletora de Al, Figura 4.30, com um orifício quadrado (6,9 cm x 6,9 cm) e um restritor de fluxo para permitir o acoplamento do estojo com as 10 miniplacas e a passagem de H₂O. A

caixa refletora foi construída para ser preenchida com D₂O e posicionada na face oeste do núcleo. Também foram especificadas, pelo Centro de Engenharia Nuclear (CEN) (Apêndice A), e fabricadas, pela Centro de Combustíveis Nucleares (CCN), 10 miniplacas de UAl_x-Al com 1,9045 g de ²³⁵U e 7,82375 g de ²³⁸U cada, que foram alojadas em um estojo e posicionadas no orifício da caixa, Figura 4.24. Foram realizados três experimentos de análise por ativação e medidas de parâmetros neutrônicos do núcleo do reator que serão detalhados posteriormente. Para a realização dos experimentos de análise por ativação foram utilizados dois sistemas de espectrometria gamma:

1. Bancada Ortec - HPGe (Germânio Hiper Puro):

- Bancada experimental utilizada na espectrometria gama das folhas, ilustrada na Figura 4.25, que consiste de um detector de germânio de alta pureza (HPGe) da EG&G Ortec acoplado a dois reservatórios de nitrogênio líquido para refrigeração; blindagem de chumbo, para diminuição da radiação de fundo, e, com gaveta para o posicionamento das folhas; fonte de alimentação de alta tensão; amplificador de sinal e um micro computador Pentium III com uma placa de aquisição de dados e um programa para a análise do espectro [11].

2. Sistema de detecção Canberra:

- Bancada experimental utilizada na espectrometria gama de combustíveis, ilustrada na Figura 4.26, que consiste de um detector de germânio de alta pureza (HPGe) da Canberra acoplado a um reservatório de nitrogênio líquido para refrigeração; blindagem de chumbo para diminuição da radiação de fundo; sistema de movimentação do suporte dos fios e instrumentação associada. A eletrônica associada é toda ela condensada no módulo DSA 2000, que contém o pré-amplificador, o amplificador, o multicanal e a fonte de alimentação de baixa e de alta tensão e um microcomputador com o software Genie 2000, que faz a comunicação entre o microcomputador e o módulo DSA 2000, e também tem a função de realizar a aquisição de dados na espectrometria gama [11].

Cada sistema possui uma resolução melhor para determinadas faixas de energia, de forma que ambos foram utilizados neste trabalho devido às diferentes energias dos gammas analisados nos experimentos.

Figura 4.23: Caixa refletora de Al.

Figura 4.24: Miniplacas de UAl_x -Al mais o estojo.

Figura 4.25: Sistema para espectrometria gamma Ortec.

Figura 4.26: Sistema para espectrometria gamma Canberra.

4.2.2.1 Experimento 1

O primeiro experimento realizado para este trabalho consiste de uma miniplaca combustível (identificação UC-08) de UAl_x-Al com 9,9 g de U e enriquecimento isotópico de 19,577 (em ^{235}U) que foi posicionada na face oeste do núcleo, perpendicularmente às varetas combustíveis de UO_2 , que compõem o núcleo do reator IPEN/MB-01, a 1,5 cm destas. O experimento foi realizado para o núcleo com a configuração 28 x 26 conforme a Figura 4.30. Abaixo seguem os dados da operação do reator. Para este experimento foram projetados e construídos dois suportes de acrílico: o primeiro (Figura 4.27) para posicionar a miniplaca faceada ao núcleo e o outro (Figura 4.28) para se posicionar a miniplaca no detector de germânio para varredura. A miniplaca foi irradiada por 1 hora e após 17 horas decaindo foi levada ao detector de germânio (Canberra) onde foi feita a varredura (Figura 4.29). Para se realizar o cálculo da atividade na miniplaca foi necessário primeiro se determinar a eficiência (E) do detector da Canberra (Apêndice D), uma vez que o mesmo nunca foi utilizado para esta aplicação com combustíveis dispersão tipo placa. O valor da eficiência do detector obtida foi de $0,00078 \pm 0,00005$. Essa eficiência foi calculada para uma região de 1,136 cm de comprimento e 4 cm de largura da parte ativa da miniplaca, que possui um comprimento total de 11,8 cm e largura total de 4 cm, região essa determinada como responsável pela emissão de gammas que chegam ao detector. A atividade da miniplaca foi calculada utilizando-se a Equação 4.3 (dedução Apêndice E). O experimento demonstra que apenas uma miniplaca insere uma quantidade insignificante de reatividade no sistema, visto que o reator ficou crítico com as mesmas posições de barras (B1 58,00% retiradas e B2 58,00% retiradas) para o mesmo experimento sem a miniplaca. A atividade de ^{99}Mo obtida foi de 127620 Bq ($\sigma A_0 = 13700$).

Dados de Operação:

- Potência: 100,7 W;
- Posição Crítica das Barras: BC-1 58% retiradas e BC-2 58% retiradas;
- Tempo de Operação (Irradiação): 1 hora;
- Tempo de Rampa (1 - 10 W): 2 minutos, 07 segundos e 37 centésimos.

$$A_0^{Mo} = \frac{\frac{C_{Cont.}}{\epsilon} - A}{D * (B - C) + E} \quad (4.3)$$

sendo,

- $C_{Cont.}$ é o número de contagens obtidas pelo detector;
- ϵ é a eficiência do detector;
- A , B , C , D e E são, respectivamente, as Equações 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 abaixo:

$$\left[\frac{\gamma_{99mTc} * I_{99mTc} * A_0^{99mTc}}{\lambda_{99mTc}} * e^{-\lambda_{99mTc} * t_e} (1 - e^{-\lambda_{99mTc} * \Delta t}) \right] \quad (4.4)$$

$$\left[\frac{e^{-\lambda_{99Mo} * t_e}}{\lambda_{99Mo}} (1 - e^{-\lambda_{99Mo} * \Delta t}) \right] \quad (4.5)$$

$$\left[\frac{e^{-\lambda_{99mTc} * t_e}}{\lambda_{99mTc}} (1 - e^{-\lambda_{99mTc} * \Delta t}) \right] \quad (4.6)$$

$$\left[\frac{\lambda_{99mTc} * \gamma_{99mTc} * I_{Tcm}}{\lambda_{99mTc} - \lambda_{99Mo}} \right] \quad (4.7)$$

$$\left[\frac{\gamma_{99Mo} * I_{99Mo}}{\lambda_{99Mo}} * e^{-\lambda_{99Mo} * t_e} (1 - e^{-\lambda_{99Mo} * \Delta t}) \right] \quad (4.8)$$

- λ é a constante de decaimento do ^{99}Mo e do ^{99m}Tc ;
- t_e é o tempo de espera para início das contagens;
- Δt é o tempo de contagens no detector;
- γ é o *Branch* do ^{99}Mo e do ^{99m}Tc ;
- I é a abundância gamma do ^{99}Mo e do ^{99m}Tc ;
- A_0^{99mTc} é a atividade inicial do e do ^{99m}Tc ;

Figura 4.27: Suporte para irradiação das miniplacas.

Figura 4.28: Régua suporte para varredura das miniplacas.

Figura 4.29: Régua suporte para varredura com a miniplaca sendo posicionada o detector.

Figura 4.30: Núcleo 26 x 28 do reator IPEN/MB-01.

4.2.2.2 Simulação do Experimento 1

O experimento acima descrito foi simulado utilizando-se o módulo de queima T5-DEPL do programa SCALE 6.0. O Apêndice F contém o input desta simulação. O valor da atividade encontrada para o ^{99}Mo na simulação foi de 136500 Bq ($\sigma A_0 = 13000$).

Comparando o valor da atividade medida com o da simulação encontramos uma diferença de 6,5%. Este valor está dentro da incerteza de 10%, portanto os resultados das simulações apresentaram boa concordância com os resultados experimentais.

4.2.2.3 Experimento 2

O segundo experimento deste trabalho foi realizado utilizando-se a caixa refletora, o estojo, uma miniplaca *dummy* (placa de Al sem U) e 5 folhas de Au hiper-puras, isto é, 99,99% de átomos de ouro, fabricadas pela Goodfellow (Inglaterra) [22] com espessuras de 0,01932 cm e raio de 0,849 cm. A Tabela 4.11 apresenta a massa das 5 folhas de Au que foram medidas em uma balança de alta precisão. A caixa foi preenchida com D₂O e o estojo foi posicionado no orifício contendo uma miniplaca *dummy* com as 5 folhas de ouro coladas verticalmente ao longo da miniplaca em ordem numérica de cima para baixo. O experimento foi realizado para o núcleo com a configuração 28 x 26. Abaixo seguem os dados da operação do reator. A miniplaca foi irradiada por 1 hora e após 18 horas e 14 min decaindo as 5 folhas de ouro começaram a ser levadas ao detector (Ortec) onde foram feitas as varreduras para se determinar, através de espectrometria gama, a atividade induzida. A atividade das folhas foram calculadas utilizando-se a Equação 4.9. A Tabela 4.12 apresenta a atividade obtida em cada uma das 5 folhas de Au. A Figura 4.31 apresenta o perfil da atividade das 5 folhas. A Figura demonstra o perfil do fluxo de nêutrons ao longo do eixo z da miniplaca.

Dados de Operação:

- Potência: 100 W;
- Posição Crítica das Barras: BC-1 50,02% retiradas e BC-2 50,04% retiradas;
- Tempo de Operação (Irradiação): 1 hora;
- Tempo de Rampa (1 - 10 W): 1 minuto, 26 segundos e 53 centésimos.

Tabela 4.11 - Massa das 5 folhas hiper-puras de Au.

Folha	Massa (g)
1	0,0294
2	0,0295
3	0,0291
4	0,0295
5	0,0298

$$A = \frac{\lambda * C * e^{\lambda * t_e}}{\epsilon * I * (1 - e^{\lambda * t_c})} \quad (4.9)$$

sendo,

- λ é a constante de decaimento do ^{198}Au ;
- C é o número de contagens obtidas pelo detector;
- t_e é o tempo de espera para início das contagens;
- ϵ é a eficiência do detector;
- I é a abundância gamma do ^{198}Au ;
- t_c é o tempo de contagens no detector.

Tabela 4.12 - Atividade medida em cada uma das 5 folhas de Au.

Folha	Atividade (Bq)	σA_0
1	1357,4	140,09
2	1450,8	149,52
3	1493,6	154,13
4	1513,5	156,19
5	1559,7	160,93

Figura 4.31: Perfil das atividades medidas das 5 folhas.

4.2.2.4 Simulação do Experimento 2

O experimento acima descrito foi simulado utilizando-se o módulo de queima T5-DEPL do programa SCALE 6.0. A Tabela 4.13 apresenta os valores das atividades do ^{198}Au encontradas nas folhas. A Figura 4.32 apresenta a comparação dos valores, das atividades nas 5 folhas, simulados e medidos. A Figura demonstra que os resultados das simulações apresentaram boa concordância com os resultados experimentais.

Tabela 4.13 - Atividade simulada em cada uma das 5 folhas de Au.

Folha	Atividade (Bq)	σA_0
1	1303	128,5
2	1328	129,0
3	1399	138,5
4	1358	133,0
5	1378	135,0

Figura 4.32: Comparação das atividades simuladas e medidas das 5 folhas.

4.2.2.5 Experimento 3

O terceiro experimento deste trabalho foi realizado utilizando-se a caixa refletora, o estojo, as 10 miniplacas fabricadas e 1 folha de Au hiper-pura com espessuras de 0,01932 cm, raio de 0,849 cm e massa de 0,0295 g. A caixa foi preenchida com D_2O , o estojo foi posicionado no orifício contendo as 10 miniplaca e a folha de ouro foi colada no meio da miniplaca UC-03, que estava na terceira posição mais próxima do núcleo. O experimento foi realizado para o núcleo com a configuração 28 x 26. Abaixo seguem os dados da operação do reator. As miniplacas e a folha de ouro foram irradiadas por 0,5 hora e após 18 horas e 29 minutos decaindo começaram a ser levadas aos detectores, Canberra e Ortec respectivamente, onde foram feitas as varreduras para se determinar, através de espectrometria gama, a atividade de ^{99}Mo induzida pela depleção das miniplacas e a atividade induzida na folha. A atividade da folha foi calculada utilizando-se a Equação 4.9. A atividade obtida

para a folha foi de 508,86 Bq ($\sigma A_0 = 49,6$). Para se realizar o cálculo da atividade nas miniplacas foi necessário primeiro se determinar a eficiência (E) do detector da Canberra (Apendice D), uma vez que o mesmo nunca foi utilizado para esta aplicação com combustíveis dispersão tipo placa. O valor da eficiência do detector obtida foi de $0,00078 \pm 0,00005$. Essa eficiência foi calculada para uma região de 1,136 cm de comprimento e a 4 cm de largura da parte ativa das miniplacas, que possui um comprimento total de 11,8 cm e largura total de 4 cm, região essa determinada como responsável pela emissão de gammas que chegam ao detector. A atividade das miniplacas foi calculada utilizando-se a Equação 4.3. A Tabela 4.14 apresenta a atividade obtida em cada uma das miniplacas para a região de eficiência do detector. A Figura 4.33 apresenta o perfil da atividade das 10 miniplacas. A Figura demonstra o perfil do fluxo de nêutrons à medida que a posição das miniplacas no estojo se afastam do núcleo.

Dados de Operação:

- Potência: 100 W;
- Posição Crítica das Barras: BC-1 48,42% retiradas e BC-2 50% retiradas;
- Tempo de Operação (Irradiação): 30 minutos;
- Tempo de Rampa (1 - 10 W): 2 minuto, 1 segundos e 20 centésimos.

Tabela 4.14 - Atividade do ^{99}Mo medida em cada uma das miniplacas para a região de eficiência do detector.

Miniplaca	Atividade (Bq)	σA_0
1	68472	7530
2	61955	6810
3	56659	6230
4	53839	5920
5	54608	6010
6	50523	5550
7	47907	5270
8	46859	5150
9	42002	4620
10	48415	5400

Figura 4.33: Perfil das atividades de ^{99}Mo medidas em cada uma das 10 miniplacas.

4.2.2.6 Simulação do Experimento 3

O experimento acima descrito foi simulado utilizando-se o módulo de queima T5-DEPL do programa SCALE 6.0. A atividade obtida para a folha de Au foi de 511 Bq ($\sigma A_0 = 52,2$). Comparando o valor da atividade medida com o da simulação encontramos uma diferença de 0,59%. Este valor está dentro da incerteza de 10%, portanto o resultado da simulação apresentou boa concordância com o resultado experimental. A Tabela 4.15 apresenta os valores das atividades do ^{99}Mo encontradas nas miniplacas. A Figura 4.34 apresenta a comparação dos valores, das atividades nas 10 miniplacas, simulados e medidos. Pode-se notar, observando o gráfico, a boa concordância sistêmica entre os resultados das simulações e dos experimentos.

Tabela 4.15 - Atividade do ^{99}Mo simulada em cada uma das miniplacas para a região de eficiência do detector.

Miniplaca	Atividade (Bq)	σA_0
1	62260	6250
2	51940	5150
3	47040	4600
4	42370	4230
5	41340	4090
6	38190	3850
7	34930	3440
8	34450	3400
9	35320	3500
10	38530	3825

Figura 4.34: Comparação das atividades de ^{99}Mo simuladas e medidas das 10 miniplacas.

Estes resultados poderiam ser ainda melhores, mas conforme apresentado em [32] a espessura da parte ativa das miniplacas ao longo do seu comprimento ativo pode variar de 0,79 mm a 1,0 mm, de forma que teve que se adotar um valor médio de 0,9 mm na região central das miniplacas para se realizar as simulações, ou seja, a diferença maior entre alguns valores simulados e experimentais são devidos a incerteza das espessuras reais da parte ativa destas miniplacas. Outro fator que influenciou na diferença entre os resultados foi o valor da potência real do sistema e o valor simulado. O reator IPEN/MB-01 possui um detector de nêutrons posicionado na face norte do núcleo calibrado para uma configuração 28 x 26, de forma que o sistema de controle do reator indica a potência em função do fluxo de nêutrons que chega no detector para esta configuração. Quando a caixa refletora composta com o estojo e as 10 miniplacas é posicionada na face oeste do núcleo diminui-se a fuga de nêutrons do sistema devido ao fato de o D_2O possuir alto poder de moderação e sua seção de choque de absorção para nêutrons térmicos ser 47 vezes menor do que a do H_2O , de forma que o perfil do fluxo de nêutrons se altera. Duas simulações foram realizadas com o programa CITATION para avaliar o fluxo de nêutrons na região do detector:

- A primeira simulação foi realizada com núcleo 28 x 26, com as barras em posições críticas (B1 58,00% retiradas e B2 58,00% retiradas) e potência de operação igual 100 W;
- A segunda simulação foi realizada com núcleo 28 x 26, com as barras em posições críticas (B1 49,25% retiradas e B2 49,25% retiradas), com a caixa refletora completa com D_2O e com o estojo composto com as 10 miniplacas de UAl_x-Al , posicionado no orifício quadrado, e potência de operação igual 100 W.

As simulações demonstram que o fluxo de nêutrons na região do detector, Tabela 4.16, para uma mesma potência de operação, é 8,91% menor para o segundo caso. Das simulações pode-se notar que quando o experimento estava sendo realizado, a potência real de operação estava um pouco acima do indicado pela instrumentação, pois para se ter o fluxo de nêutrons para o qual o detector está calibrado, na configuração da segunda simulação, a potência estava aproximadamente 8,91% mais alta, ou seja, a potência adotada nas simulações está abaixo do valor real, mas para se obter a potência real do sistema é necessário se refazer o experimento e medir a potência pela técnica de análise de ruído.

Tabela 4.16 - Fluxo de nêutrons na região do detector.

Simulação	Fluxo (n/cm ² .s)
1	4,82*10 ⁰⁷
2	4,40*10 ⁰⁷

Um outro ponto importante a ser observado é a diferença entre os valores, simulado e medido, obtidos da atividade de ⁹⁹Mo, Figura 4.34, para a miniplaca 8 (UC-08). Esta já havia sido irradiada anteriormente, experimento 1, de forma que os produtos de fissão formados alteraram a sua composição inicial, ou seja, esse produtos de fissão influenciaram diretamente nos resultados medidos e simulados neste experimento, contribuindo, assim, ainda mais no distanciamento dos valores para esta miniplaca.

4.2.3 Análise de Criticalidade

Foram feitas várias simulações utilizando-se os códigos CITATION e SCALE 6.0, esses programas utilizam diferentes metodologias de cálculo. Utilizou-se o módulo CSAS5 do SCALE 6.0 par estas análises. As bibliotecas de seções de choque para o programa CITATION foram geradas com a metodologia de cálculo de constantes de grupo implementada no IPEN para o cálculo das seções de choque multigrupo do núcleo. Na metodologia implementada pelo IPEN para geração de constantes de grupo, são utilizados dois sistemas: o sistema NJOY99.0 e o sistema AMPX-II (Apêndice B). A biblioteca de dados nucleares acessada nos cálculos realizados neste trabalho para processar os dados nucleares e gerar as seções de choque utilizadas no CITATION foi a *Evaluated Nuclear Data File* (ENDF/B-VII). O programa SCALE 6.0 possui bibliotecas de dados nucleares próprias, essas foram processadas também utilizando-se a ENDF/B-VII. Essas análises foram realizadas para se validar os programas comparando-os com dados experimentais. A análises foram realizadas para várias configurações do núcleo do reator já realizadas experimentalmente. Também foram feitas simulações para os experimentos propostos neste trabalho. As simulações de análise de criticalidade foram realizadas com os dois programas e os resultados confrontados entre si. Todas as simulações foram realizadas para o núcleo 28 x 26 do reator IPEN/MB-01. Foram realizadas oito simulações para o núcleo do reator. Algumas simulações foram realizadas com as barras de controle em posições diferentes e outras com

as barras paralelas.

1. A primeira simulação foi realizada com núcleo 28 x 26 e com as barras em posições críticas (B1 22,088% retiradas e B2 55,824% retiradas). O valor do k_{eff} encontrado com CITATION foi igual a 0,9998825 e com o SCALE 6.0 igual a 1,001466. A diferença no valor do k_{eff} entre os programas foi de 157 pcms. A diferença no valor do k_{eff} entre a simulação do CITATION e do valor experimental foi de -11,75 pcms. A diferença no valor do k_{eff} entre a simulação do SCALE 6.0 e do valor experimental foi de +146,6 pcms. Neste caso o CITATION teve um valor mais próximo do experimental. Os Apêndices G e H apresentam, respectivamente, os inputs das modelagens deste caso no CITATION e no SCALE 6.0;
2. A segunda simulação foi realizada com núcleo 28 x 26, com as barras em posições críticas (B1 58,00% retiradas e B2 58,00% retiradas). O valor do k_{eff} encontrado com CITATION foi igual a 0,9990164 e com o SCALE 6.0 igual a 1,00038. A diferença no valor do k_{eff} entre os programas foi de 136,36 pcms. A diferença no valor do k_{eff} entre a simulação do CITATION e do valor experimental foi de -98,36 pcms. A diferença no valor do k_{eff} entre a simulação do SCALE 6.0 e do valor experimental foi de +38 pcms. Neste caso os dois programas tiveram valores bem próximos do experimental;
3. A terceira simulação foi realizada com núcleo 28 x 26, com as barras em posições críticas (B1 22,088% retiradas e B2 55,824% retiradas) e com a miniplaca posicionada a 1,5 cm das varetas mais externas da face oeste do núcleo. O valor do k_{eff} encontrado foi igual a 1,001659. A diferença entre esta simulação e a primeira foi de 19,3 pcms. Esta simulação foi realizada com o módulo de análise de criticalidade (energia continua) do SCALE 6.0. O experimento demonstra que apenas uma miniplaca não inseri um valor mensurável de reatividade no núcleo;
4. A quarta simulação foi realizada com núcleo 28 x 26, com as barras em posições críticas (B1 22,088% retiradas e B2 55,824% retiradas) e com a caixa refletora cheia de D₂O, sem o orifício quadrado. O valor do k_{eff} encontrado com o programa SCALE 6.0 foi igual a 1,011043 e com o programa CITATION foi igual a 1,0088727. A diferença no valor do k_{eff} entre os programas foi de 217 pcms. A diferença no valor

do k_{eff} da primeira simulação realizada com o SCALE 6.0 para esta foi de +957,7 pcms, com o CITATION a diferença foi de +899 pcms. As reatividades calculadas inseridas estão em acordo com os dados experimentais (reatividade inserida pela caixa de D₂O igual a +937 pcms [11]);

5. A quinta simulação foi realizada com núcleo 28 x 26, com as barras em posições críticas (B1 22,088% retiradas e B2 55,824% retiradas) e com a caixa refletora cheia de D₂O, mas sem o estojo com as 10 miniplacas, ou seja, somente H₂O passando pelo orifício quadrado. O valor do k_{eff} encontrado com o programa SCALE 6.0 foi igual a 1,009853 e com o programa CITATION foi igual a 1,0074557. A diferença no valor do k_{eff} entre os programas foi de 239,73 pcms. A diferença no valor do k_{eff} da primeira simulação realizada SCALE 6.0 para esta foi de +838,7 pcms, com o CITATION a diferença foi de +757 pcms. Os resultados se aproximam do resultado experimental de 795 pcms, realizado para este trabalho;
6. A sexta simulação foi realizada com núcleo 28 x 26, com as barras em posições críticas (B1 49,25% retiradas e B2 49,25% retiradas) e com a caixa refletora completa com D₂O, mas sem o orifício quadrado, ou seja, a caixa foi simulada inteira. O valor do k_{eff} encontrado com o programa SCALE 6.0 foi igual a 0,999311 e com o programa CITATION foi igual a 0,9963486. A diferença no valor do k_{eff} entre os programas foi de 296 pcms. A diferença no valor do k_{eff} entre a simulação do SCALE 6.0 e do valor experimental foi de -68,9 pcms primeira. A diferença no valor do k_{eff} entre a simulação do CITATION e do valor experimental foi de -365,14 pcms. Neste caso o SCALE 6.0 teve um valor mais próximo do experimental;
7. A sétima simulação foi realizada com núcleo 28 x 26, com as barras em posições críticas (B1 49,25% retiradas e B2 49,25% retiradas), com a caixa refletora completa com D₂O e com o estojo composto com as 10 miniplacas de UAl_x-Al, posicionado no orifício quadrado, contendo 1 folha de ouro (folha 6) fixada no centro da miniplaca 3. A folha de ouro foi considerada apenas na simulação do programa SCALE 6.0. O valor do k_{eff} encontrado com o programa SCALE 6.0 foi igual a 0,999012 e com o programa CITATION foi igual a 0,9963216. A diferença no valor do k_{eff} entre os programas foi de 269,04 pcms. A diferença no valor do k_{eff} entre a simulação do

SCALE 6.0 e do valor experimental foi de -98,8 pcms primeira. A diferença no valor do k_{eff} entre a simulação do CITATION e do valor experimental foi de -367,84 pcms. Neste caso o SCALE 6.0 teve um valor mais próximo do experimental;

8. A oitava simulação foi realizada com núcleo 28 x 26, com as barras em posições críticas (B1 49,25% retiradas e B2 49,25% retiradas), com a caixa refletora completa com D₂O, mas sem o estojo composto com as 10 miniplacas de UAl_x-Al, ou seja, somente H₂O passando pelo orifício quadrado. O valor do k_{eff} encontrado com o programa SCALE 6.0 foi igual a 0,99816. e com o programa CITATION foi igual a 0,9948890. A diferença no valor do k_{eff} entre os programas foi de 327,1 pcms. A diferença no valor do k_{eff} entre a simulação do SCALE 6.0 e do valor experimental foi de -184 pcms primeira. A diferença no valor do k_{eff} entre a simulação do CITATION e do valor experimental foi de -511,1 pcms. Neste caso o SCALE 6.0 teve um valor mais próximo do experimental.

As simulações demonstram que as duas metodologias se aproximam dos valores experimentais obtidos. As Tabelas 4.17 e 4.18 e as Figuras 4.35 e 4.36 a seguir demonstram as diferenças detalhadas entre os resultados simulado e experimental. A Figura 4.35 demonstra que:

1. Nas simulações com barras em posições diferentes (1, 3, 4 e 5) o CITATION apresenta valores mais próximos dos experimentos, exceto para a terceira simulação que não foi realizada com o programa devido as dificuldades de geração de seção de choque homogenizada para este caso;
2. Na simulação com barras em posições paralelas (2), mas sem a caixa de água pesada, os dois programas apresentaram valores muito próximos dos valores experimentais;
3. Para as simulações com as barras paralelas e a caixa de água pesada posicionada na face oeste do núcleo (6, 7 e 8) o programa SCALE 6.0 apresenta resultados mais próximos dos experimentos.

A Figura 4.36 demonstra que os dois programas apresentam o mesmo comportamento quando comparados com os resultados experimentais.

Tabela 4.17 - Valor do K_{eff} simulado (SCALE 6.0 e CITATION) e experimental.

Simulação	Posi. BC 1 (%)	Posi. BC 2 (%)	SCALE 6.0 (k_{eff})	CITATION (k_{eff})	Exp. (k_{eff})
1	22,088	55,824	1,001466	0,9998825	1,00000
2	58,000	58,000	1,000380	0,9990164	1,00000
3	22,088	55,824	1,001659	—	1,00000
4	22,088	55,824	1,011043	1,0088727	1,00937
5	22,088	55,824	1,009853	1,0074557	1,00795
6	49,250	49,250	0,999311	0,9963486	1,00000
7	49,250	49,250	0,999012	0,9963216	1,00000
8	49,250	49,250	0,998160	0,9948890	1,00000

Figura 4.35: Valor do K_{eff} simulado (SCALE 6.0 e CITATION) e experimental.

Tabela 4.18 - Diferenças do K_{eff} entre os valores encontrados para as simulações e os experimentais.

Simulação	SCALE 6.0 x CITATION (pcms)	SCALE 6.0 x Exp. (pcms)	CITATION x Exp. (pcms)
1	+158,35	+146,6	-11,75
2	+136,36	+38,0	-98,36
3	—	+165,9	—
4	+217,00	+167,3	-49,73
5	+239,73	+190,3	-45,43
6	+296,24	+69,9	-365,14
7	+269,04	-98,8	-367,84
8	+327,10	-184,0	-511,10

Figura 4.36: Diferenças do K_{eff} entre os valores encontrados para as simulações e os experimentais.

Conclusões

Neste trabalho foi realizado uma comparação entre três tipos de alvo ($\text{UAl}_2\text{-Al}$, U-Ni cilíndrico e U-Ni placa) para a produção de ^{99}Mo . Para isso foram desenvolvidas análises neutrônicas e termo-hidráulicas. Também foram realizados experimentos para se validar as metodologias de cálculo termo-hidráulica e neutrônica utilizadas neste trabalho.

A partir dos cálculos neutrônicos apresentados podemos concluir que o reator IEA-R1 poderia ser utilizado na produção de ^{99}Mo nacional desde que fosse operado a 5 MW e o DIM reprojetoado para acoplar mais miniplacas. As análises neutrônicas realizadas para o RMB demonstram que os três tipos de alvo ($\text{UAl}_2\text{-Al}$, U-Ni cilíndrico e U-Ni placa) contendo a mesma massa total de ^{235}U (20,1 g) e sob as mesmas condições de irradiação atenderiam a demanda dos hospitais brasileiros. Ao final da irradiação a atividade total obtida para o ^{99}Mo nas 10 placas de $\text{UAl}_2\text{-Al}$ foi de 2980,62 Ci, mas como são necessários mais 7 dias de resfriamento para iniciar-se o processo químico de separação a quantidade final de ^{99}Mo para processamento e distribuição do ^{99}Tc cai para 509,57 Ci. Para o alvo de U-Ni cilíndrico a atividade total obtida para o ^{99}Mo ao final da irradiação foi de 3166,6 Ci e após os 7 dias de resfriamento a atividade caiu para 541,36 Ci. Para o alvo de U-Ni placa a atividade total obtida para o ^{99}Mo ao final da irradiação foi de 3495,23 Ci e após os 7 dias de resfriamento a atividade caiu para 597,5 Ci. A partir desses valores, é de se notar que a demanda corrente brasileira de 450 Ci de ^{99}Mo por semana e a demanda futura projetada de 1000 Ci podem ser atendidas, desde que se aumente o número de placas irradiadas, usando-se os alvos de $\text{UAl}_2\text{-Al}$ e/ou U-Ni alvos no RMB.

A análise termo-hidráulica para o IEA-R1 indica que mesmo para velocidades inferiores a 5 m/s (35 m³/h) são suficientes para refrigerar os alvos, de forma que não será necessário

desviar uma quantidade significativa da vazão total de fluido refrigerante do núcleo do reator para refrigerar o DIM, ou seja, a adição do dispositivo com as miniplacas não irá prejudicar o resfriamento dos elementos combustíveis que compõem o núcleo, mas para evitar o desvio de vazão desnecessário do núcleo pelas miniplacas será necessário fabricar um restritor de fluxo de fluido refrigerante, a fim de manter a velocidade de refrigeração desejada no DIM (3,085 m/s). Através dos cálculos térmico-hidráulicos determinou-se uma velocidade mínima para a refrigeração de cada um dos 3 tipos de alvo no RMB. As análises demonstram que será necessário uma velocidade mínima de 7 m/s para o UAl_x , de 8 m/s para o alvo de U-Ni cilíndrico e de 9 m/s para o alvo de U-Ni placa para que nenhum limite de projeto seja ultrapassado. Para estas velocidades as temperaturas no fluido refrigerante calculados estão abaixo do valor de 114 °C, e as temperaturas de refrigeração estão abaixo da temperatura de ONB, indicando um fluxo monofásico através dos canais dos dispositivos de irradiação.

Os experimentos realizados neste trabalho demonstram que os programas neutrônicos e termo-hidráulicos aqui utilizados são ferramentas muito precisas. Os experimentos termo-hidráulicos demonstram que os programas MTRCR-IEAR1 e CFX apresentaram resultados em boa concordância com os experimentos. As simulações realizadas com o CFX para o cálculo dos coeficientes de perda de carga para o DIM contendo o estojo e as miniplacas e o mesmo sem estojo apresentaram resultados em boa concordância com os experimentos. O resultado foi um desvio de 1,98% em relação ao obtido pelo experimento para a condição com estojo e miniplacas e de 3,86% para a condição sem estojo. As temperaturas calculadas pelos programas CFX e MTRCR-IEAR1 no revestimento das miniplacas de UAl_x -Al para o reator IEA-R1 apresentam uma diferença de até 16%, isso ocorre porque o CFX está subestimando os valores de temperatura, pois os coeficientes de transferência de calor não são estimados por correlações empíricas e o MTRCR-IEAR1 superestima os valores de temperatura por ser mais conservativo.

Os experimentos neutrônicos demonstram que os programas SCALE 6.0 e CITATION apresentam boa concordância com os resultados experimentais. Os três experimentos realizados permitiram a validação do módulo T5-DEPL do SCALE 6.0, pois os valores experimentais e simulados apresentam boa concordância quando comparados. As análises de criticalidade aqui realizadas indicam que os programas reproduzem bem os resultados

experimentais, assim como as seções de choque geradas com os sistemas NJOY e AMPX-II e as bibliotecas de dados nucleares próprias do SCALE 6.0 estão processadas de acordo.

Apêndice

A

Especificação das Miniplacas Combustíveis de $\text{UAl}_x\text{-Al}$

A.1 Objetivo

A.1.1) Este documento apresenta as especificações técnicas para as miniplacas alvos contendo dispersão de $\text{UAl}_x\text{-Al}$ a serem empregadas em testes de irradiação na UCRI, para validação de cálculos neutrônicos e medidas de produção de ^{99}Mo pelo processo de fissão do ^{235}U .

A.1.2) São apresentadas as especificações do pó de UAl_2 , pó de Al e da miniplaca alvo acabada.

A.1.3) Não é objetivo desta especificação a descrição dos procedimentos de fabricação do briquete ou seu processamento.

A.1.4) Esta especificação não inclui itens para prevenir acidentes de criticalidade nem requisitos de segurança pessoal e de instalações.

A.2 Documentos Aplicáveis

A.2.1 Especificações Técnicas de Referência

A.2.1.1) PSI.REN.IEAR1.002 ESPT.017.R00 - Especificação do Pó de Alumínio para o Briquete da Placa Combustível do E.C. e E.C.C. do Reator IEA-R1.

A.2.1.2) PSI.REN.IEAR1.002 ESPT.003.R01 - Especificação do Briquete de $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ para a Placa Combustível do E.C. e E.C.C. do Reator IEA-R1.

A.2.1.3) PSI.REN.IEAR1.002 ESPT.007.R00 - Especificação da Moldura e Revestimento para a Placa Combustível do E.C. e E.C.C. do reator IEA-R1.

A.2.2 American Society for Testing and Materials (ASTM) Standards

A.2.2.1) C696-80 - *Methods for Chemical, Mass Spectrometric and Spectrochemical Analysis of Nuclear Grade Uranium Dioxide Powders and Pellets.*

A.2.2.2) C699-79 - *Methods for Chemical, Mass Spectrometric and Spectrochemical Analysis of , and Physical Test on Beryllium Oxide Powder.*

A.2.2.3) B214-76 - *Test Method for Sieve Analysis of Granular Metal Powders.*

A.2.2.4) B215-60 - *Method of Sampling Finished Lots of Metal Powders.*

A.2.2.5) C753-78 - *Specification for Nuclear-Grade Sinterable Uranium Dioxide Powder.*

A.2.2.6) E34 - *Chemical Analysis of Aluminium and Aluminium Alloys.*

A.2.2.7) C559-79 - *Method for Bulk Density and Physical Measurement of Manufactured Carbon and Graphite Articles.*

A.2.2.8) E2 - *Preparation of Micrographic of Metals and Alloys.*

A.2.2.9) E3 - *Preparation of Metallographic Specimens.*

A.2.2.10) E29 - *Recommended Practice for Indicating Which Places of Figures are to be Considered Significant in Specified Limiting Values.*

A.2.2.11) E94 - *Recommended Practice for Radiographic Testing.*

A.2.2.12) B209M - *Spec. for Aluminum- Alloy Sheet and Plate (Metric).*

A.2.2.13) E8 - *Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials.*

A.2.2.14) E18 - *Tests for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials.*

A.2.2.15) E55 - *Sampling Wrought Nonferrous Metals and Alloys for Determination of Chemical Composition.*

A.2.3 Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)

A.2.3.1) CNEN-NE-1.16 - Garantia da Qualidade para Usinas Nucleoelétricas.

A.3 Descrição da Miniplaca Alvo e Componentes

A.3.1) Miniplaca alvo - Miniplaca metálica produzida por laminação contendo no seu interior a dispersão de $UAlx-Al$ com revestimento de alumínio. A miniplaca é obtida pelo processo de laminação a quente de um conjunto constituído de um briquete contido em uma moldura e revestido dos dois lados por placas de alumínio.

A.3.2) Briquete - Compactado contendo o material combustível na forma de UAl_2 disperso em alumínio. O briquete é produzido por meio da prensagem de uma mistura de pós de UAl_2 e de Al . Possui geometria e densidade apropriadas para produzir um cerne combustível no alvo acabado, dentro das características desejadas.

A.3.3) Moldura - Dispositivo de alumínio que serve para posicionar o briquete na montagem da miniplaca e que demarca a região ativa da miniplaca alvo. Os requisitos da moldura são especificados no item 4.4.

A.3.4) Revestimento - Placa de alumínio que reveste o briquete e a moldura. Os requisitos do revestimento são especificados no item 4.4.

A.4 Materiais

Os materiais utilizados para a fabricação dos componentes das miniplacas alvos estão indicados nos itens 4.1 a 4.4.

A.4.1 Requisitos para o Material Combustível

O material combustível especificado para a fabricação da miniplaca alvo é o UAl_2 (em pó).

A.4.1.1 A.4.1.1 Requisitos Químicos

A composição química do pó tem os valores especificados na Tabela A.1. Todas as análises químicas devem ser realizadas em lotes representativos e preparados de acordo com as seções A.4.1.4 e A.4.1.5 deste documento. Métodos químicos analíticos usados devem estar de acordo com os métodos especificados no item A.2.2.1 ou outros que sejam provados equivalentes.

Tabela A.1 - Composição química do material base para fabricação do pó de UAl_2 .

Elemento	Especificação
Urânio	$81,3 \pm 3\%$ em peso
Oxigênio	0,60% em peso (máximo)
Carbono	0,18% em peso (máximo)
Nitrogênio	0,045% em peso (máximo)
Hidrogênio	0,020% em peso (máximo)
EBC ^a	30 ppm (máximo)

EBC^a = conteúdo de boro equivalente

A.4.1.2 A.4.1.2 Concentração Isotópica

A concentração isotópica do ^{235}U é de $19,75 \pm 0,20\%$ em peso.

A.4.1.3 A.4.1.3 Requisitos Físicos

A.4.1.3.1) - Tamanho das partículas:

- No mínimo 75% do pó devem ter tamanho das partículas entre $150\ \mu\text{m}$ e $44\ \mu\text{m}$. No máximo 25% em peso de pó devem ter partículas menores que $44\ \mu\text{m}$. O método para determinação do tamanho das partículas deve estar de acordo com o método do item A.2.2.3 ou outro provado equivalente.

A.4.1.3.2) - Área de superfície específica:

- A área de superfície específica deve ser menor que $0,15\ \text{m}^2/\text{g}$. O método de determinação da superfície específica deve utilizar a adsorção de nitrogênio, método de B.E.T.

A.4.1.3.3) - Massa específica:

- A massa específica do pó de UAl_2 deve ser maior que $7,8 \text{ g/cm}^3$. O método de determinação da massa específica deve utilizar picnometria com hélio.

A.4.1.4 A.4.1.4 Requisitos de Lote

A.4.1.4.1) - Um lote é definido como uma quantidade de pó de UAl_2 que é uniforme em características químicas, isotópicas e físicas, produzida a partir de um mesmo processo de fusão.

A.4.1.4.2) - A identidade de um lote deve ser mantida durante todo o processamento sem se misturar com os demais lotes.

A.4.1.4.3) - O enquadramento a esta especificação deve ser feito para cada lote de pó.

A.4.1.5 A.4.1.5 Amostragem

A.4.1.5.1) - As operações de amostragem, pesagem e manuseio de amostras devem ser conduzidas sob condições que assegurem que a amostra é representativa do lote. O fabricante deve propor planos de amostragem para aprovação podendo tomar por base o item A.2.2.4.

A.4.1.5.2) - O fabricante deve fornecer, quando requisitado, uma amostra representativa de cada lote para serem feitas determinações de propriedades químicas, físicas ou nucleares.

A.4.1.5.3) - A quantidade de amostras de um lote deve ser suficiente para executar todos os ensaios de controle de qualidade a serem realizados pelo fabricante, ensaios para confirmação de resultados, quando necessários, e ensaios de aceitação e recebimento do lote, também quando requisitados.

A.4.1.5.4) - As amostras destinadas aos ensaios de recebimento e aceitação devem ser embaladas em um recipiente separado, identificado claramente pelo número do lote enviado pelo fabricante antes ou juntamente com o lote. As amostras de referência

para confirmação de resultados, quando necessários, devem ser claramente identificadas e mantidas nas instalações do fabricante até que o lote tenha sido formalmente aceito.

A.4.1.6 A.4.1.6 Testes e Certificados

A.4.1.6.1) - O fabricante deve ensaiar as amostras descritas na seção A.4.1.5 para assegurar o enquadramento do pó de UAl_2 aos requisitos da seção A.4.1.1 a A.4.1.3. Todos os ensaios devem ser conduzidos empregando-se técnicas especificadas neste documento ou por técnicas propostas pelo fabricante que devem ser aprovadas previamente pelo requisitante.

A.4.1.6.2) - O fabricante deve fornecer documentação certificando que o material atende aos requisitos das seções A.4.1.1 a A.4.1.3.

A.4.1.6.1) - O fabricante deve fornecer todos os dados obtidos nos ensaios realizados para certificar que o pó de UAl_2 atende aos requisitos das seções A.4.1.1 a A.4.1.3.

A.4.1.6.3) - Poderão ser realizados testes de aceitação ou recebimento tanto em amostras fornecidas pelo fabricante quanto em amostras retiradas do lote enviado. A aceitação será por lote com base em avaliação das propriedades especificadas nas seções A.4.1.1 a A.4.1.3.

A.4.1.6.4) - No caso de disputa quanto a resultados analíticos, será designado, de comum acordo entre as partes, um órgão independente para arbitragem.

A.4.2 Requisitos para o Pó de Al

A especificação do pó de alumínio está baseada na especificação do item A.2.1.1.

A.4.2.1 A.4.2.1 Requisitos Químicos

As análises químicas devem ser realizadas em lotes representativos e preparadas de acordo com a seção A.4.2.5 deste documento. Métodos químicos analíticos usados devem estar de acordo com os métodos especificados no item A.2.2.6 ou outros que sejam provados equivalentes.

A.4.2.1.1) - Conteúdo de alumínio em pó:

- O conteúdo de Alumínio deve ser superior a 99%.
- O conteúdo de Al_2O_3 deve ser inferior a 0,7%.

A.4.2.1.2) - Composição química do material base:

- A composição química do material base para a fabricação do pó tem os valores especificados na Tabela A.2. A soma da contribuição de todos os elementos diferentes de alumínio não deve ultrapassar 1% em peso. Se na análise de algum elemento for definido um valor “menor que” ($<$) uma determinada concentração, este valor deve ser usado.

Tabela A.2 - Composição química do material base para fabricação do pó de Alumínio.

Elemento	Concentração (% em peso)
Cu	< 500 ppm
Fe + Si	$< 0,95$
Mn	$< 0,05$
Zn	$< 0,10$
Outros	$< 0,15$ (total) $< 0,05$ (individual)
Al	> 99
B	< 10 ppm
Cd	< 10 ppm
Li	< 10 ppm
Co	< 10 ppm

A.4.2.1.3) - Conteúdo de impurezas no pó:

- O conteúdo de impurezas no pó de alumínio não deve ultrapassar os seguintes valores:
 - Voláteis $< 0,1\%$;
 - Óleos e graxas $< 0,2\%$.

A.4.2.2 A.4.2.2 Requisitos de Lote

A.4.2.2.1) - Um lote é definido como uma quantidade de pó de alumínio que é uniforme em características químicas, isotópicas e físicas, produzidas numa mesma batelada e ocasião.

A.4.2.2.2) - A identidade de um lote deve ser mantida durante todo o processamento sem se misturar com os demais lotes.

A.4.2.2.3) - O enquadramento a esta especificação deve ser feito para cada lote de pó.

A.4.2.3 A.4.2.3 Amostragem

A.4.2.3.1) - As operações de amostragem, pesagem e manuseio de amostras devem ser conduzidas sob condições que assegurem que a amostra é representativa do lote. O fabricante deve propor planos de amostragem para aprovação podendo tomar por base o item A.2.2.4.

A.4.2.3.2) - O fabricante deve fornecer, quando requisitado, uma amostra representativa de cada lote para serem feitas determinações de propriedades químicas, físicas ou nucleares.

A.4.2.3.3) - A quantidade de amostras de um lote deve ser suficiente para executar todos os ensaios de controle de qualidade a serem realizados pelo fabricante, ensaios para confirmação de resultados, quando necessários, e ensaios de aceitação e recebimento do lote, também quando requisitados.

A.4.2.3.4) - As amostras destinadas aos ensaios de recebimento e aceitação devem ser embaladas em um recipiente separado, identificado claramente pelo número do lote enviado pelo fabricante antes ou juntamente com o lote. As amostras de referência para confirmação de resultados, quando necessários, devem ser claramente identificadas e mantidas nas instalações do fabricante até que o lote tenha sido formalmente aceito.

A.4.2.4 A.4.2.4 Testes e certificados

A.4.2.4.1) - O fabricante deve ensaiar as amostras descritas na seção A.4.2.4 para assegurar o enquadramento do pó de Al aos requisitos das seções A.4.2.1 a A.4.2.3. Todos os ensaios devem ser conduzidos empregando-se técnicas especificadas neste documento ou por técnicas propostas pelo fabricante que devem ser aprovadas previamente pelo requisitante.

A.4.2.4.2) - O fabricante deve fornecer documentação certificando que o material atende aos requisitos das seções A.4.2.1 a A.4.2.2.

A.4.2.4.3) - Poderão ser realizados testes de aceitação ou recebimento tanto em amostras fornecidas pelo fabricante quanto em amostras retiradas do lote enviado. A aceitação será por lote com base em avaliação das propriedades especificadas nas seções A.4.2.1 a A.4.2.2.

A.4.2.4.4) - No caso de disputa quanto a resultados analíticos, será designado, de comum acordo entre as partes, um órgão independente para arbitragem.

A.4.3 Requisitos para a Moldura e Revestimento

A.4.3.1 A.4.3.1 Material

Alumínio 6061-T0.

A.4.3.2 A.4.3.2 Requisitos Químicos

A.4.3.2.1) - O material para a construção da moldura e do revestimento da miniplaca alvo deve obedecer aos requisitos de composição química descritos na Tabela A.3.

A.4.3.2.2) - A análise da corrida para o material deve ser conduzida de acordo com os procedimentos do item A.2.2.6. A tomada de amostras para as análises devem obedecer os critérios do item A.2.2.15.

A.4.3.3 A.4.3.3 Requisitos Mecânicos

A.4.3.3.1) - Propriedades de tração:

Tabela A.3 - Limites da composição química do alumínio Liga 6061.

Elemento	Concentração (% em peso)
Si	0,40 - 0,80
Cu	0,15 - 0,40
Fe	0,7
Mn	0,15
Mg	0,80 - 1,20
Cr	0,04 - 0,35
Zn	0,25
Ti	0,15
Outros (cada)	(0,05) Total 0,15
Al	balanço

- As propriedades do material testado à temperatura ambiente deverão estar de acordo com os requisitos da Tabela A.4.

Tabela A.4 - Propriedades mecânicas requeridas à temperatura ambiente da liga 6061 (T0).

Propriedades	Recozido
Tensão de Ruptura (Mpa) (max)	150
Tensão de Escoamento (0,2%) (Mpa) (max)	85
Elongação min. em 50 mm (%)	18
Dureza (min)	20 HB

A.4.3.3.2) - Ensaio de tração e dureza:

- Os ensaios de tração devem ser conduzidos de acordo com os métodos do item A.2.2.13.
- Os ensaios de dureza devem ser conduzidos de acordo com os métodos do item A.2.2.14.
- Os resultados desses testes devem obedecer às especificações do item A.4.4.4.1.

A.5 Características Físicas

A.5.1 Dimensões da Miniplaca Alvo

Tabela A.5 - Dimensões do alvo para produção de ^{99}Mo .

Discriminação	Especificação
Dimensões da Miniplaca	
Comprimento (mm)	170^{+1}
Largura (mm)	$46,5^{+0,5}$
Espessura (mm)	$1,52^{+0,05}$
Dimensões do Cerne	
Comprimento (mm)	118^{+3}
Largura (mm)	$40,0^{+3}$
Espessura (mm)	$0,76^{+0,05}$
Acabamento superficial	Livre de riscos, ranhuras e pites. Máxima profundidade de defeito na área do cerne = 0,1 mm Máxima profundidade de defeito na área restante = 0,127 mm
Espessura mínima do revestimento (vide item 5.1.1)	Zona 1 : 0,30 mm Zona 2: 0,25 mm

A.5.1.1 A.5.1.1 Espessura Mínima do Revestimento

São especificados na Tabela A.5 valores de espessuras mínimas do revestimento para as zonas 1 e 2, que são, respectivamente, as zonas central e de extremidades do cerne (dog bone) da miniplaca, conforme indicações na Figura 4.24.

A.5.2 Quantidade de Material Combustível

A.5.2.1 A.5.2.1 Quantidade de ^{235}U na Miniplaca Alvo

Quantidade mínima de ^{235}U requerida na miniplaca alvo acabada: 1,90 g ^{235}U .

A.6 Inspeção da Miniplaca Alvo Acabada

A.6.1 Ensaios não Destrutivos

A.6.1.1 A.6.1.1 Inspeção Visual

A inspeção visual deverá ser realizada em todos os alvos. A superfície da miniplaca deverá ser analisada visualmente a olho nú, com lupa ou através de rugosímetro. Riscos, buracos ou outros defeitos são aceitos quando inferiores a 0,1 mm em profundidade, de forma que fiquem garantidas as espessuras mínimas especificadas no item A.5.1.1.

A.6.1.2 A.6.1.2 Exame Dimensional

O exame dimensional deverá ser realizado em todas as miniplacas alvos. As espessuras do revestimento e do núcleo deverão ser determinadas através de técnicas adequadas e efetivas, demonstradas pelo fabricante.

Todas as dimensões externas bem como as dimensões internas devem ser determinadas e estar de acordo com as dimensões apresentadas nas tabelas e figuras do item A.5.1.

A.6.1.3 A.6.1.3 Exame Radiográfico

Todas as miniplacas alvos devem ser radiografadas para a localização do cerne e verificação da homogeneidade da distribuição das partículas de combustível (UAl_x).

A.6.1.3.1) - Partículas combustíveis fora do cerne da miniplaca alvo (*white points*):

- É permitida a existência de partículas combustíveis de diâmetros entre 0,1 e 0,5 mm incrustadas entre a moldura e o revestimento na região fora do cerne da miniplaca alvo. Não é permitida a existência dessas partículas numa área de contorno de 0,4 mm de largura ao longo das bordas terminais da miniplaca. A distância entre partículas não pode ser inferior a 0,5 mm e não é permitida a existência destas partículas na região de numeração da miniplaca alvo.

A.6.1.4 A.6.1.4 Contaminação Superficial

A contaminação superficial da miniplaca alvo não deve exceder a 10 $\mu\text{gU/placa}$.

A.6.2 Ensaios Destrutivos

Devem ser executados ensaios destrutivos em um alvo representativo de cada lote de alvos fabricados, laminados na mesma ocasião e usando as mesmas características de aquecimento e parâmetros de laminação. Devem ser retiradas amostras representativas das extremidades e da região central, deve ser caracterizada a espessura do revestimento e o seu caldeamento na região do cerne e da moldura.

A.6.2.1 A.6.2.1 Uso de Miniplacas Alvos Rejeitadas

Uma miniplaca alvo acabada que tenha sido rejeitada por razões diferentes do que devido a espessuras impróprias do revestimento e do cerne, ou defeitos na união metalúrgica entre o cerne e o revestimento pode ser usada para as análises metalográficas.

A.6.2.2 A.6.2.2 Medições Adicionais

Se alguma medida de espessura do revestimento ou determinação de união metalúrgica entre o cerne e o revestimento não estiver dentro das tolerâncias especificadas, devem ser escolhidas aleatoriamente mais três miniplacas alvos adicionais do mesmo lote da miniplaca que apresentou o defeito e serem seccionadas e examinadas como descrito no item A.7.2 se alguma das amostras adicionais não estiver dentro das especificações, todas as miniplacas alvos daquele lote devem ser rejeitadas.

A.7 Identificação

A.7.1 Tipo de Identificação

A miniplaca alvo deve ser identificada por meio de uma marcação composta de quatro caracteres alfanuméricos gravados sobre a superfície da extremidade inferior da miniplaca, fora da região do cerne, conforme indicação na figura do item A.5.1. Serão utilizados os caracteres UC mais sequência numérica.

A.7.2 Método de Marcação

Marcação em baixo relevo com pantógrafo. Caracteres com 3 mm de altura e 0,1 mm de profundidade.

A.8 Limpeza e Acabamento

Não serão admissíveis resíduos de óleos, graxas, produtos de limpeza, materiais estranhos e/ou rebarbas de fabricação incorporadas às placas acabadas.

A.9 Manuseio, Embalagem, Transporte e Armazenamento

Durante manuseio, embalagem, transporte e armazenamento das miniplacas alvos deve-se procurar manuseá-las ou apoiá-las de forma adequada de modo que não ocorram empenamentos ou danos nas mesmas.

Após controle de qualidade final, os alvos devem ser revestidos com capa protetora de polietileno de modo a ficarem protegidos contra poeira e umidade.

A.10 Documentos Requeridos e Certificados

O fabricante das placas alvos deve fornecer para aprovação, antes da fabricação, os procedimentos de fabricação e inspeção.

O fabricante deve fornecer documentos certificando que a placa alvo foi fabricada, testada e examinada de acordo com esta especificação, juntamente com os relatórios dos resultados de todos os testes e exames realizados.

A.11 Programa de Garantia da Qualidade

O fabricante das miniplacas alvos deve ser responsável por estabelecer e manter um Programa de Garantia da Qualidade a fim de controlar e garantir que a qualidade durante fabricação, testes e exames estejam de acordo com os requisitos impostos por esta especificação. O Programa deve ser documentado em um Manual de Garantia da Qualidade e estar de acordo com o item A.2.3.

Descrição dos Programas Utilizados

B.1 HAMMERTECHNION

A adequação dos arquivos de dados nucleares para aplicações em reatores nucleares é determinada com base em análises de *benchmark* de experimentos em reatores térmicos. É necessário que esses experimentos sejam claramente definidos, e que eles sejam analisados com o uso dos métodos teóricos mais rigorosos.

Embora o cálculo com base na teoria de Monte Carlo pode alcançar o nível de precisão exigido, eles exigem a introdução de aproximações, a fim de reduzir o tempo de cálculo computacional.

A análise de *benchmark* de reatores térmicos é um dos principais meios utilizados para testar a adequação dos conjuntos de dados nucleares básicos para cálculos de reator. O programa HAMMER foi aplicado à análise de *benchmark* de experimentos térmicos com bastante sucesso.

O HAMMER *Code System*, aqui descrito, pode ser usado para dois propósitos principais:

1. Análise de *benchmark* de reatores térmicos no âmbito do programa de testes de dados ENDF/B;
2. A preparação de alguns parâmetros de estrutura de grupo para serem utilizados posteriormente no cálculo do núcleo do reator.

O programa HAMMER utiliza método *Nordheim Integral Treatment* (Equação B.1), que é um método aproximado para determinar o espectro de nêutrons no interior de materiais que contenham seções de choque de ressonância, combinado com correções disponíveis

nas bibliotecas ENDF/B que são desenvolvidos para melhorar a concordância com o ponto básico de medições de seção choque. O perfil tabelado pode ser exatamente o alargamento *Doppler* para toda a temperatura desejada.

$$\sigma_{\alpha}^g = \frac{\int_{\Delta E_g} dE \psi_r(E) \sigma_{\alpha}(E)}{\int_{\Delta E_g} \psi_r(E) dE} \quad (\text{B.1})$$

sendo,

- $\psi_r(E)$ o espectro do fluxo no material da ressonância;
- $N\Delta E_g$ o intervalo de energia do grupo g ;
- α denota o tipo de reação de nêutrons-núcleo.

Na prática, em sistemas de processamento multigrupo de seção choque, as seções de choque multigrupo do material de ressonância produzidas com o método *Nordheim* combina o espectro gerado com as seções de choque multigrupo dos material sem ressonância (geralmente ponderada por um espectro de fluxo assumido), a energia adicional e o colapso espacial dos dados é realizada através do cálculo de fluxo de um subsequente transporte multigrupo ou o cálculo de difusão.

B.2 Programa Computacional CITATION

Em 1969, foi publicada a primeira versão do programa computacional CITATION desenvolvida para resolver problemas envolvendo a representação de diferenças finitas da teoria de difusão que trata até três dimensões do espaço com a dispersão arbitrária de grupo-a-grupo [23]. O CITATION resolve os seguintes problemas nas geometrias $x - y - z$, $\theta - r - z$, *hexagonal* - z e *triagonal* - z :

- problema de depleção do combustível;
- gerenciamento do combustível para análise multi-ciclo;
- resultados de perturbação de primeira ordem que podem ser obtidos fornecendo dados macroscópicos e concentrações dos núclídeos; e

- problemas estatísticos podem ser resolvidos e resultados de perturbações obtidos com dados macroscópicos.

O CITATION resolve a equação de difusão que expressa uma aproximação para o transporte de nêutrons em uma posição $\bar{\mathbf{r}}$ e energia E . Abaixo está descrita a Equação no modelo de multi-grupo que é utilizada para obter um tipo da diferença finita de contrapeso do nêutron sobre elementos discretos do volume.

$$-D_{\mathbf{r},g}\nabla^2\phi_{\mathbf{r},g} + (\Sigma_{a,\mathbf{r},g} + \sum_n \Sigma_{s,\mathbf{r},g\rightarrow n} + D_{\mathbf{r},g}B_{\perp,g}^2)\phi_{\mathbf{r},g} = \sum_n (\Sigma_{s,\mathbf{r},n\rightarrow g} + \frac{s_g(v\Sigma)_f_{\mathbf{r},n}}{k_e})\phi_{\mathbf{r},n}, \quad (\text{B.2})$$

sendo,

- ∇^2 = O operador geométrico Laplaciano, $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ em geometria retangular, cm^{-2} ;
- $\phi_{\mathbf{r},g}$ = O fluxo de nêutrons em uma posição $\mathbf{r}$ e em um grupo de energia g , $n/s.cm^2$;
- $\Sigma_{a,\mathbf{r},g}$ = A seção de choque macroscópica de absorção, normalmente medido através de um espectro representativo do fluxo de energia, cm^{-1} ;
- $\Sigma_{s,\mathbf{r},g\rightarrow n}$ = A seção de choque macroscópica de espalhamento dos nêutrons provenientes do grupo de energia g para o grupo de energia n , cm^{-1} ;
- $D_{\mathbf{r},g}$ = O coeficiente de difusão em cm^{-1} ;
- $v\Sigma_{f,\mathbf{r},g}$ = A seção de choque macroscópica de produção de nêutrons onde v é o número de nêutrons produzidos por fissão e Σ_f é a seção choque macroscópica de fissão, cm^{-1} ;
- s_g = O número de nêutrons emitidos por cm^3/s pela fonte; e
- k_e = O fator de multiplicação efetivo, razão entre a taxa de produção e a taxa de perda de nêutrons.

B.3 SCALE 6.0

Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation (SCALE 6.0), é um sistema de softwares desenvolvido no *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL), amplamente utilizado e aceito em todo o mundo para análise de reatores nuclear. O SCALE é um sistema modular desenvolvido para integrar a capacidade de cálculo de programas computacionais individuais em sequências automatizados. Neste trabalho foram utilizados os módulos CSAS5 e T5-DEPL:

- O módulo CSAS5 realiza análises de criticalidade de sistemas utilizando o programa KENOV.a, que calcula o transporte de nêutrons através do método estatístico Monte Carlo para determinação dos fluxos;
- O módulo T5-DELP realiza análises de queima de combustíveis utilizando o KENOV.a para o cálculo dos fluxos, utiliza o programa KMART5 para extrair o fluxo, determinar as distribuições de potência e colapsar as seções de choque para o formato de três grupos. O programa COUPLE é utilizado para atualizar a biblioteca de seções de choque do programa ORIGEN-S com os dados lidos da biblioteca ponderada (gerada pelo KMART5). O programa ORIGEN-S realiza a queima dos materiais.

B.4 MTRCR-IEAR1

O modelo termo-hidráulico MTRCR-IEAR1 foi desenvolvido no IPEN-CNEN/SP em 2000 usando o programa comercial *Engineering Equation Solver* (EES) [23]. Ele consiste de um conjunto de equações de balanço de fluxo de calor, correlações para cálculo do coeficiente de película, número de Reynolds, número de Prandtl e condições de contorno que são resolvidas simultaneamente. O uso desse modelo computacional permite uma análise termo-hidráulica de reatores de pesquisa com elementos combustíveis MTR. Os seguintes parâmetros são calculados ao longo dos canais dos elementos combustíveis: temperatura no centro do combustível T_c , temperatura no revestimento T_r , temperatura no fluido refrigerante T_f , temperatura para início de ebulição nucleada (*Onset of Nucleate Boiling* - ONB) T_{onb} , fluxo crítico de calor (*Departure of Nucleate Boiling*-DNB), instabilidade do fluxo e as margens de segurança termo-hidráulicas MDNBR e FIR. As margens de segurança

termo-hidráulicos MDNBR e FIR são calculadas como a relação entre, respectivamente, o fluxo de calor crítico e o fluxo de calor para instabilidade do fluxo, e o fluxo de calor local. Além disso, o modelo MTCR-IEA-R1 também utiliza no cálculo as incertezas envolvidas no cálculo termo-hidráulico, por exemplo, incertezas de fabricação do combustível, erro no cálculo de distribuição de densidade de potência, na distribuição de vazão no núcleo e nas margens de segurança para os coeficientes de transferência de calor. O cálculo dos parâmetros térmicos e hidráulicos são comparados com os limites de projeto estabelecidos para combustíveis MTR no item 3.1.2.

B.5 Ansys CFX®

O CFX é um programa amplamente utilizado e testado no meio acadêmico e industrial, pois é um software de alta performance, que possibilita alta velocidade no processamento e acurácia nos cálculos, permitindo assim uma ampla aplicação em estudos de fluidodinâmica [24].

O CFX é um dos programas que compõem o pacote de mecânica dos fluidos distribuídos pela empresa Ansys. O CFX utiliza o método de discretização por volumes finitos para solucionar as equações de Navier-Stokes. Com essa metodologia o domínio de fluido estudado é dividido em pequenas sub-regiões (volume de controle) onde as equações são resolvidas iterativamente, fornecendo valores médios das variáveis em pontos específicos do domínio [25]. Desta maneira são obtidos os campos de velocidade, temperatura, pressão, densidade, etc do escoamento em regime estacionário ou transiente. Utilizando a discretização por volume finitos, assim como em qualquer outro tipo de discretização associado a soluções numéricas, quanto maior e mais complexa for a geometria, maior será o número de volumes finitos requeridos e maiores recursos computacionais serão necessário para resolver o problema.

O programa CFX é utilizado para diversas análises na área de engenharia nuclear como: diluição de boro, heterogeneidade na distribuição do fluxo, distribuição de hidrogênio, instabilidade do núcleo e outros. Testes realizados com CFX pela OECD *Nuclear Energy Agency* verificam e validam o software quanto sua utilização em engenharia nuclear [26].

B.6 AMPEX-II e NJOY99.0

Nos cálculos realizados neste trabalho utilizou-se a metodologia de cálculo de constantes de grupo implementada no IPEN para o cálculo das seções de choque multigrupo do núcleo. Na metodologia implementada pelo IPEN para geração de constantes de grupo, são utilizados dois sistemas: o sistema NJOY e o sistema AMPX-II [27].

O sistema NJOY é composto de módulos específicos com a finalidade de acessar a biblioteca básica, efetuar interpolações, alargamento de ressonâncias e ponderação pelo espectro típico do problema a ser calculado. No final do processo obtém-se um conjunto de seções de choque no formato multigrupo. A definição de seção de choque relativa ao grupo g tem a forma apresentada na Equação B.3 abaixo:

$$\langle \sigma_x \rangle_g = \frac{\int_{E_{g+1}}^{E_g} \sigma(E) w(E) d(E)}{\int_{E_{g+1}}^{E_g} w(E) d(E)} \quad (\text{B.3})$$

sendo,

- σ_x é a de choque seção microscópica;
- w é a função ponderação;
- E é o intervalo de energia;
- g é o índice do grupo de energia;
- x é o tipo de reação (captura, fissão, etc.).

O NJOY possui vários módulos para diferentes finalidades. Neste trabalho foram utilizados os seguintes módulos: MODER, RECONR, BROADR, UNRESR, THERMR e GROUPR. O módulo MODER transforma um arquivo formatado (ASCII) em um arquivo binário ou vice-versa. O módulo RECONR reconstrói explicitamente a dependência energética das seções de choque numa forma pontual e num único *grid* de energia a partir dos parâmetros de ressonância e das leis de interpolação da ENDF/B-VII. As seções de choque resultantes são escritas em um arquivo denominado PEND (*Pointwise Evaluated Nuclear Data File*) que possui a mesma padronização do formato ENDF. O módulo BROADR realiza o alargamento Doppler de todas as reações utilizando o arquivo PENDF, o alargamento é efetuado para uma dada temperatura de aplicação e o resultado final também é escrito

num novo arquivo PENDF. O módulo UNRESR produz as seções de choque efetivas na região de ressonâncias não resolvidas. Os dados são escritos numa forma tabular: seções de choque em função da temperatura e *background cross sections* na região de ressonância não resolvida. O módulo THERMR produz seções de choque e matrizes de espalhamento na forma pontual para região de energia térmica dos nêutrons. Neste módulo é realizado o tratamento do modelo de espalhamento para as matrizes de espalhamento utilizando o modelo de gás livre ou as funções $S(\alpha, \beta)$, este último utilizado neste trabalho. Até o módulo THERM os dados nucleares são produzidos independentes da aplicação e as seções de choque estão numa forma pontual e linearizada (PENDF). O único parâmetro que restringe o uso destes dados é a temperatura utilizada na matriz de espalhamento térmica. O módulo GROUPR processa as seções de choque pontuais em parâmetros de multigrupo utilizando o método de Bondarenko. Neste ponto o elo entre os dados nucleares independentes da aplicação e os dados nucleares para uma aplicação específica é introduzido através da estrutura de multigrupo e do espectro de ponderação adequado ao problema. Os resultados são gravados num arquivo denominado GENDF (Groupwise ENDF). Os dois arquivos gerados são: o arquivo PENDF e o arquivo GENDF; estes arquivos contêm seções de choque na forma pointwise e na forma multigrupo, respectivamente [28].

A biblioteca de dados nucleares que o sistema NJOY acessou nos cálculos realizados neste trabalho para processar os arquivos de dados nucleares é a ENDF/B-VII.

Os arquivos PENDF e GENDF serão reformatados do sistema NJOY para o sistema AMPX-II através de dois programas de interface: AMPXR e BRDROL, desenvolvidos pelo IPEN. O programa AMPXR transforma os dados nucleares multigrupo (GENDF) calculados com o módulo GROUPR em um formato compatível com o sistema AMPX-II, cujo arquivo de saída do programa é denominado de arquivo MASTER. O programa BRDROL transforma os dados nucleares no formato PENDF gerado pelo módulo BROADR num formato compatível com o sistema AMPX-II. Os dados pontuais são utilizados pelo módulo ROLAIDS do sistema AMPX-II para o tratamento da autoblindagem na forma pontual [29].

O programa AMPX-II é um sistema modular com vários programas, porém, na elaboração das bibliotecas de seções de choque para este trabalho foram utilizados somente alguns destes módulos. Os módulos utilizados neste trabalho são: RADE, AJAX, ROLAIDS,

CLAROL e XSDRNPM. O módulo RADE verifica a consistência do arquivo MASTER, onde se encontram os dados nucleares na forma multigrupo. A verificação da consistência é realizada em termos de comparação entre a soma das grandezas parciais em relação a grandeza total. O módulo AJAX adiciona ou exclui conjuntos de seções de choque de um dado núclideo da biblioteca MASTER. O módulo ROLAIDS resolve a equação integral de transporte de nêutrons assumindo correção de transporte na região de ressonâncias resolvidas. O módulo CLAROL substitui ou adiciona as seções de choque auto-blindadas geradas pelo módulo ROLAIDS na biblioteca MASTER proveniente do programa AMPXR. O arquivo de saída deste módulo é uma biblioteca de seções de choque multigrupo autoblindadas. No módulo XSDRNPM a equação de transporte é solucionada pelo Método de Ordenadas Discretas e a estrutura de grupo original é colapsada por zona num formato de poucos grupos [30]. A Figura B.1 mostra a metodologia de cálculo, descrita, aplicada na geração de constantes de grupo.

Figura B.1: Processamento de Dados Nucleares para Cálculos Determinísticos.

As seções de choque geradas fora utilizadas no programa CITATION para a modelagem tridimensional do núcleos para as análises de criticalidade.

C

Input do Programa MTRCR-IEAR1

C.1 INPUT - UAl_x-Al - Irradiação das Miniplacas na Posição Central do Reator IEA-R1

{Simulação simplificada do Elemento de miniplacas –

Posição CENTRAL / UAlx PLACA DE 4cm e 2.91gU/cm³
Análise Conservativa

MAXIMA TEMP. ENT.42 C

Mini Placas com as Seguintes dimensões:

Hc=714,4 mm altura do canal (não importa para modelo térmico; é só para acertar a u3si48_2.1kt)

Hp= 118 altura ativa da placa

Lp =40 mm largura ativa da placa

Lc =47mm Largura do canal

Ec=3.70 mm espessura do canal de refrigeração

Ef=0.76 mm{espessura do fuel}

Er=0.38 mm{espessura do revestimento}

Densidade de potência máxima W/cm³

hipoteses:

–regime permanente;

–

– }

{Definicao de algumas funcoes para facilitar na solucao}

{Funcao para calculo do Numero de Reynolds}

```

FUNCTION rey(m1,dh1,mi1,ae1)
rey:=m1*dh1/(mi1*ae1)
END

```

```

{Funcao para calculo do Numero de Prandtl}
FUNCTION prn(cp1,mi1,k1)
prn:=cp1*mi1/k1
END

```

```

{determinacao do coeficiente de pelicula}
FUNCTION h(k,dh,re,pr,mi1,mip)

ht:=0.023*(re**0.8*pr**0.4)*k/dh+(mi1/mip)*0
{ht:=0.027*(re**0.8*pr**0.33)*k/dh+(mi1/mip)**0.14}
hl:=8.235*k/dh {a verificar se necessario}
hlt:=((re-2000)*ht+(4000-re)*hl)/2000
if ( re>4000) Then

    h:=ht

Else

    if (re<2000) Then

        h:=hl

    Else

        h:=hlt

    Endif
Endif
END

```

```

n=25 { número de volumes axiais}

```

```

{=====}
{=====Bloco principal de entrada =====}
{=====}

```

```

{vaz=13,0} {m3/h} {Vazão no elemento combustivel}
fev=1.0 {fator de erro na vazão}
vaz1=vaz/3600
g=vaz1/ae*rho[1]/11 {fluxo de massa}
Tsats=114.02

```

```

te= 42 {temperatura do refrigerante na entrada do canal C}

Ntp =10 {No. total de mini-placas comb.}
Vtc = Ntp*vtp{ vol. total das mini placas}
Pop= 60000 { Pot. de dissipada nas mini-placas W}
{cor=1 { COR=1>>>> Bergles&Rohsenow; COR=0 >>>> Dittus & Boelter}}
f=1.0 {fatores de incerteza}

{=====}

{dados - canal/placa}
Hp=0.118 {altura da placa em m}
Hc=170.0
Lc=47.0e-3 {largura do Canal em m}
Lp=40.0e-3 {largura ativa da placa em m}
Ep=1.52e-3 {espessura total da placa m}
Ef=0.76e-3{espessura do fuel}
Er=0.38e-3{espessura do revestimento}
Ec=3.7e-3{espessura do canal em m}

DUPLICATE I=0,n-1
m[i+1]=fev*vaz1*rho[i+1]/11 { vazao massica por canal kg/s Div 12 canais }
END

P1=1.01635 {pressão de operação }
ae=Lc*Ec {area de escoamento de um canal em m2}

Pm=2*(Ec+Lc){ perimetro molhado}
at=Hp*Lp {area de troca de cond. em m2}
atr=at/n {area de troca por região}
dh=4*ae/Pm {diametro hidraulico em m}

vtp=Ef*Lp*Hp {volume total de combustivel P/ 1 mini-placa m3}
vtr=vtp/n {volume total por regioao}
{vel=m/(rho[1]*ae)}

{propriedades fisicas no SI}

DUPLICATE I=0,n-1
rho[i+1]=DENSITY(Water,T=T1[i],P=P1) {densidade}
cpa[i+1]=SPECHEAT(Water,T=T1[i],P=P1)*1000 {calor especifico}
ka[i+1]=CONDUCTIVITY(Water,T=T1[i],P=P1)
mi1[i+1]=VISCOSITY(Water,T=T1[i],P=P1)
mip[i+1]=VISCOSITY(Water,T=T2[i],P=P1)

```

```

pr [ i +1]=prn ( cpa [ i +1] ,mi1 [ i +1] ,ka [ i +1])
re [ i +1]=rey (m[ i +1] ,dh ,mi1 [ i +1] ,ae)
h [ i +1]=h (ka [ i +1] ,dh ,re [ i +1] ,pr [ i +1] ,mi1 [ i +1] ,mip [ i +1])

```

END

```

kf=50.0{ {W/m K} K medio para comb. de 4.8 gU/cm^3}
Kr=180 {W/m K}

```

```

q= Pop/(Vtp*Ntp) {Densidade de potencia w/m3}

```

```

DUPLICATE i=1,n
L[ i]=i/n
u[ i]=INTERPOLATE1 ( 'teste.lkt' , 'q2' , 'Hc' , Hc=L[ i ])
Q[ i]=q*Vtr*u[ i]*f
z[ i]=L[ i]

```

```

comp[ i]=L[ i]*Hp
END

```

```

pot2=SUM(Q[ i] , i=1,n)

```

{definicao das condutancias}

```

DUPLICATE I=0,N-1
gf[ I+1]= m[ i +1]*cpa [ I+1]
gf1 [ I+1]=gf [ I+1]/2
gh[ i +1]=atr*h [ I+1]
END
gc=kf*atr*2/Ef
gr=Kr*atr/Er

```

```

t2[0]=te
t1[0]=te
t7[0]=te
t13[0]=te

```

{equacoes de balanço para regime permanente – Válidas para todo o domínio}

```

DUPLICATE i=0,n-1
0=gf1 [ I+1]*(t1 [ i]-t1 [ i+1])+gh [ I+1]*(t2 [ i+1]-t1 [ i+1])

```

{1}

```

0=gh [ i +1]*( t1 [ i +1]-t2 [ i +1])+gr*( t3 [ i +1]-t2 [ i +1])           {2}
0=gr*( t2 [ i +1]-t3 [ i +1])+gc*( t4 [ i +1]-t3 [ i +1])                   {3}
0=gc*( t3 [ i +1]-t4 [ i +1])+gc*( t5 [ i +1]-t4 [ i +1])  +q [ i +1]         {4}
0=gc*( t4 [ i +1]-t5 [ i +1])+gr*( t6 [ i +1]-t5 [ i +1])                   {5}
0=gr*( t5 [ i +1]-t6 [ i +1])+gh [ i +1]*( t7 [ i +1]-t6 [ i +1])           {6}
0=gh [ i +1]*( t6 [ i +1]-t7 [ i +1])+gh [ i +1]*( t8 [ i +1]-t7 [ i +1])+gf [ I +1]*( t7 [ i ]-t7 [ i +1])
{7}
0=gh [ i +1]*( t7 [ i +1]-t8 [ i +1])+gr*( t9 [ i +1]-t8 [ i +1])           {8}
0=gr*( t8 [ i +1]-t9 [ i +1])+gc*( t10 [ i +1]-t9 [ i +1])
{9}
0=gc*( t9 [ i +1]-t10 [ i +1])+gc*( t11 [ i +1]-t10 [ i +1])+q [ i +1]         {10}
0=gc*( t10 [ i +1]-t11 [ i +1])+gr*( t12 [ i +1]-t11 [ i +1])               {11}
0=gr*( t11 [ i +1]-t12 [ i +1])+gh [ i +1]*( t13 [ i +1]-t12 [ i +1])         {12}
0=gh [ i +1]*( t12 [ i +1]-t13 [ i +1])+gf1 [ i +1]*( t13 [ i ]-t13 [ i +1])  {13}
END

```

```
{ Verificação do M Cp Dt – Balanço das potências}
```

```
{delT=(t1 [n]-t1 [0])
Pot1= m[n/2]*cpa [n/2]*delT
```

```
Erro=abs (Pot1-Pot2 )/pot2*100 }
```

```
{ Verificação dos Demais Parâmetros Termo-hidráulicos}
```

```
{ Temperatura de ONB
```

```
Correlação de Bergles and Rohsenow
```

```
Tonb= Tsat+ 5/9 * (9.23*q/p**1,156)**(p**0.0234/2.160)
```

```
onde:
```

```
Tsat – Temperatura de Saturação
```

```
p – pressão
```

```
q – fluxo local
```

```
}
```

```
DUPLICATE i=1,n
```

```
Tonb[i] = Tsat + 5/9*(9.23*(q[i]/10000/(2*atr))/(p1**1.156))**((p1**0.0234)/2.16)
```

```
END
```

Pc=221.2 {pressão crítica }

hlg=INTERPOLATE('teste.lkt','h','pres',pres=p1)

teta=0.99531*(p1**0.3333)*((1-p1/pc)**(4/3))

vel=(vaz1/11)/ae

dtsub=tsat-t1[20]

pot3=sum(q1[i],i=1,20)

media=pot3/n

DUPLICATE I=1,n

DTS[i]=Tsatsat-t1[n]

qc[i]=145.4*teta*((1+2.5*(vel*100)**2/teta)**0.25)*(1+15.1*cpa[i]*DTS[n]/(hlg*p1**0.5))/10000

{LABUNTSOV}

q1[i]=q[i]/(2*atr*10000) {W/cm2}

MDNBR[i]=qc[i]/q1[i]

MI[i]=151*(1+0.1198*vel)*(1+0.00914*(Tsatsat-t1[n]))*(1+.19*p1) { OK com PARET}

cmi[i]=mi[i]/q1[i]

END

{INSTABILIDADE DE FLUXO

CORRELAÇÃO DE

}

eta =25

dhe=4*ae/(2*Lp+2*ec)

R=1/(1+eta*(dhe/Hp))

DUPLICATE I=1,n

{qifc[i]=R**vel*100*dhe/(Hp)*(tsatsat-t1[1])*rho[1]/1000*cpa[1]/1000*1/4}

qifc[i]=R**vel*100*(Lc*ec*0.9)/(Lp*Hp)*(tsatsat-t1[1])*rho[1]/1000*cpa[1]/1000 {Paret Prop. no pto. 1}

{qifc[i]=rho[1]/1000*cpa[1]/1000*(dhe/Hp*100)*0.25*R*(Tsatsat-te)*vel*100}

FIR[i]=qifc[i]/media { paret dividir por media}

END

{dhe=4*ae/(2*Lp+2*Ec)

R=1/(1+eta*(dhe/Hp))

DUPLICATE i=1,n

$$\{q_{ifc}[i] = \rho[i]/1000 * c_{pa}[i] * R * v_{el} * 100 * (T_{sat} - t_1[i]) * (L_p * 100 * L_c * 100) / (L_p * 100 * H_p * 100) / 10000\}$$
$$\}$$

Determinação da Eficiência do Detector Canberra para o Cálculo das Atividades das Miniplacas

Para se determinar a eficiência do detector Canberra para as miniplacas alvo foi utilizada a metodologia descrita em [21]. Neste trabalho foi utilizada uma fonte de ^{152}Eu com atividade $13,3 \pm 0,6$ kBq (em 01/03/1991) [31], que foi levada ao detector Canberra para ser realizada a contagem (espectrometria gama). As energias gama utilizadas para a determinação da eficiência são apresentadas na Tabela D.1 abaixo:

Tabela D.1 - Energias características e abundância gama do ^{152}Eu .

Energia (keV)	Probabilidade de Emissão Gama (%)	σI
121	0,3976	—
244,17	7,51	0,00050
344,62	26,58	0,00180

Utilizando-se a Equação 4.9 foi possível se determinar a atividade da fonte a partir da contagem indicada no detector. Fazendo a razão entre a atividade da fonte, para as energias descritas, medida no detector com a atividade real, obtêm-se que a eficiência para cada energia, Tabela D.2:

Tabela D.2 - Eficiência obtida para cada energia.

Energia (keV)	Eficiência E	σE
121	0.00166	$8 * 10^{-5}$
244	0.00073	$3 * 10^{-5}$
344	0.00042	$2 * 10^{-5}$

Com estas energias foi utilizado um ajuste para se determinar a eficiência para a energia gama de 141 keV, que é a energia emitida pelo $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$. O experimento com o Eu foi simulado com programa MCNP6.0 para se validar a metodologia descrita em [21] e em seguida aplica-la para as mini placas e obter-se a eficiência global do sistema para as mesmas. A diferença entre a eficiência do detector, para o Eu, simulada e medida foi de 6%. A partir disso foi simulada uma mini placa, com as mesmas dimensões da Figura 3.3, no detector emitindo gamas de 141 keV ao longo de sua parte ativa. A simulação demonstrou que apenas os fótons emitidos por uma região de 1,136 cm de comprimento e 4 cm de largura da parte ativa da mini placa, que possui um comprimento total de 11,8 cm e largura total de 4 cm, chegam ao detector. Através deste método foi obtida uma eficiência global do detector para as mini placas igual a $0,000779 \pm 0,000005$. A Figura D.1 apresenta a geometria da simulação realizada (detector mais mini placa).

Figura D.1: Geometria da simulação da miniplaca posicionada no detector Canberra.

E

Dedução da Equação para o Cálculo da Atividade do ^{99}Mo

Para se determinar a atividade de ^{99}Mo produzida nos experimentos de irradiação descritos na seção 4.2 foi preciso levar em consideração a atividade produzida pelo ^{99m}Tc . A Figura E.1 apresenta os possíveis caminhos de decaimento do ^{99}Mo para o ^{99}Tc estável. Conforme descrito no Apêndice D, a energia do gama analisado é de 141 keV. A Figura E.1 demonstra que o ^{99}Mo pode decair direto para o ^{99}Tc e emitir um gama de 141 keV ou decair direto para ^{99m}Tc (meia vida 6,01 horas) que, posteriormente, também decaí no ^{99}Tc emitindo um gama de 141 keV, ou seja, os gamas detectados nas contagens são provenientes do ^{99}Mo e do ^{99m}Tc , de forma que para se obter a atividade de ^{99}Mo produzida deve se introduzir na Equação a produção do ^{99m}Tc . Dos dois caminhos possíveis de decaimento do ^{99}Mo , o mais provável é pelo decaimento no ^{99m}Tc que possui 90% de chance de ocorrer. A dedução da Equação 4.3 é demonstrada abaixo:

 Figura E.1: Caminhos de decaimento do ^{99}Mo para o ^{99}Tc estável.

$$C_{Cont.} = \epsilon * \gamma_{^{99m}\text{Tc}} * I_{^{99m}\text{Tc}} * \int_{t_1}^{t_2} A^{^{99m}\text{Tc}} dt + \gamma_{^{99}\text{Mo}} * \epsilon * I_{^{99}\text{Mo}} * \int_{t_1}^{t_2} A^{^{99}\text{Mo}} dt \quad (\text{E.1})$$

sendo,

$$A^{^{99m}\text{Tc}} = A_0^{^{99m}\text{Tc}} * e^{-\lambda_{^{99m}\text{Tc}} * t_e} + \frac{\lambda_{^{99m}\text{Tc}} * A_0^{^{99}\text{Mo}}}{\lambda_{^{99m}\text{Tc}} - \lambda_{^{99}\text{Mo}}} (e^{-\lambda_{^{99}\text{Mo}} * t_e} - e^{-\lambda_{^{99m}\text{Tc}} * t_e}) \quad (\text{E.2})$$

e,

$$A^{^{99}\text{Mo}} = A_0^{^{99}\text{Mo}} * e^{-\lambda_{^{99}\text{Mo}} * t_e} \quad (\text{E.3})$$

- $C_{Cont.}$ é o número de contagens obtidas pelo detector;
- ϵ é a eficiência do detector;
- λ é a constante de decaimento do ^{99}Mo e do ^{99m}Tc ;
- γ é o *Branch* do ^{99}Mo e do ^{99m}Tc ;

- I é a abundância gamma do ^{99}Mo e do ^{99m}Tc ;
- A_0 é a atividade inicial do ^{99}Mo e do ^{99m}Tc ;
- t_1 e t_2 é o tempo de contagens no detector;

Resolvendo as integrais acima e isolando o termo $A_0^{99\text{Mo}}$ encontramos a Equação 4.3.

F

Input do Programa SCALE 6.0 - Experimento 1

F.1 Input - Experimento 1

```
=t5-depl      parm=(addnux=3)
Experimento 1
,
' e cond. cont. periodica
'*****
'* Library      *
'*****
238groupndf5
,
'*****
'* Materials     *
'*****
,
read composition
U-234      1 0 9.45280E-06 293.0 end
U-235      1 0 9.99100E-04 293.0 end
U-238      1 0 2.16910E-02 293.0 end
O-16       1 0 4.54640E-02 293.0 end
O-17       1 0 1.72830E-05 293.0 end
Mg-24      1 0 3.38580E-06 293.0 end
Mg-25      1 0 4.28640E-07 293.0 end
Mg-26      1 0 4.71930E-07 293.0 end
Fe-54      1 0 2.35490E-07 293.0 end
Fe-56      1 0 3.72400E-06 293.0 end
Fe-57      1 0 8.93240E-08 293.0 end
Fe-58      1 0 1.13690E-08 293.0 end
B-10       1 0 2.25610E-08 293.0 end
B-11       1 0 9.08090E-08 293.0 end
Mo-92      1 0 1.89580E-08 293.0 end
Mo-94      1 0 1.18170E-08 293.0 end
Mo-95      1 0 2.03380E-08 293.0 end
```

Mo-96	1	0	2.13090E-08	293.0	end
Mo-97	1	0	1.22000E-08	293.0	end
Mo-98	1	0	3.08560E-08	293.0	end
Mo-100	1	0	1.23020E-08	293.0	end
Co-59	2	0	1.74020E-04	293.0	end
Cr-50	2	0	7.61900E-04	293.0	end
Cr-52	2	0	1.41120E-02	293.0	end
Cr-53	2	0	1.56980E-03	293.0	end
Cr-54	2	0	3.82760E-04	293.0	end
Fe-54	2	0	3.57370E-03	293.0	end
Fe-56	2	0	5.40490E-02	293.0	end
Fe-57	2	0	1.22690E-03	293.0	end
Fe-58	2	0	1.59260E-04	293.0	end
Mn-55	2	0	1.46450E-03	293.0	end
Mo-92	2	0	1.30930E-05	293.0	end
Mo-94	2	0	7.98750E-06	293.0	end
Mo-95	2	0	1.36020E-05	293.0	end
Mo-96	2	0	1.41030E-05	293.0	end
Mo-97	2	0	7.99120E-06	293.0	end
Mo-98	2	0	1.99850E-05	293.0	end
Mo-100	2	0	7.81610E-06	293.0	end
Ni-58	2	0	5.62940E-03	293.0	end
Ni-60	2	0	2.09590E-03	293.0	end
Ni-61	2	0	8.96300E-05	293.0	end
Ni-62	2	0	2.80810E-04	293.0	end
Ni-64	2	0	6.96920E-05	293.0	end
P-31	2	0	4.00400E-05	293.0	end
S-32	2	0	1.48850E-05	293.0	end
S-33	2	0	1.13930E-07	293.0	end
S-34	2	0	6.20750E-07	293.0	end
S-36	2	0	2.78500E-09	293.0	end
Si-28	2	0	6.28990E-04	293.0	end
Si-29	2	0	3.07500E-05	293.0	end
Si-30	2	0	1.97320E-05	293.0	end
C	2	0	1.12390E-04	293.0	end
H-1	3	0	6.67360E-02	293.0	end
O-16	3	0	3.33678E-02	293.0	end
Al	4	0	4.47440E-02	293.0	end
O-16	4	0	6.70910E-02	293.0	end
O-17	4	0	2.55040E-05	293.0	end
Ag-107	5	0	2.29690E-02	293.0	end
Ag-109	5	0	2.00260E-02	293.0	end
In-113	5	0	3.36060E-04	293.0	end
In-115	5	0	7.51570E-03	293.0	end
Cd-106	5	0	3.15900E-05	293.0	end
Cd-108	5	0	2.27870E-05	293.0	end
Cd-110	5	0	3.32080E-04	293.0	end

Cd-111	5	0	3.30150E-04	293.0	end
Cd-112	5	0	6.23260E-04	293.0	end
Cd-113	5	0	3.17460E-04	293.0	end
Cd-114	5	0	7.47300E-04	293.0	end
Cd-116	5	0	1.96280E-04	293.0	end
C	5	0	1.50520E-03	293.0	end
S-32	5	0	1.78390E-04	293.0	end
S-33	5	0	1.47210E-06	293.0	end
S-34	5	0	7.92430E-06	293.0	end
S-36	5	0	2.26290E-08	293.0	end
O-16	5	0	1.76960E-03	293.0	end
O-17	4	0	6.72710E-05	293.0	end
Fe-54	6	0	3.44894E-03	293.0	end
Fe-56	6	0	5.21628E-02	293.0	end
Fe-57	6	0	1.18411E-03	293.0	end
Fe-58	6	0	1.53698E-04	293.0	end
Ni-58	6	0	6.27853E-03	293.0	end
Ni-60	6	0	2.33757E-03	293.0	end
Ni-61	6	0	9.99650E-05	293.0	end
ni-62	6	0	3.13183E-04	293.0	end
Ni-64	6	0	7.77273E-05	293.0	end
Cr-50	6	0	7.38069E-04	293.0	end
Cr-52	6	0	1.36708E-02	293.0	end
Cr-53	6	0	1.52070E-03	293.0	end
Cr-54	6	0	3.70782E-04	293.0	end
Si-28	6	0	6.12655E-04	293.0	end
Si-29	6	0	2.99512E-05	293.0	end
Si-30	6	0	1.92205E-05	293.0	end
Mn-55	6	0	1.15010E-03	293.0	end
C	6	0	8.89680E-05	293.0	end
P-31	6	0	4.50000E-05	293.0	end
Fe-54	7	0	3.74870E-03	293.0	end
Fe-56	7	0	5.66970E-02	293.0	end
Fe-57	7	0	1.28700E-03	293.0	end
Fe-58	7	0	1.67060E-04	293.0	end
Cr-50	7	0	7.59840E-04	293.0	end
Cr-52	7	0	1.40740E-02	293.0	end
Cr-53	7	0	1.56560E-03	293.0	end
Cr-54	7	0	3.81720E-04	293.0	end
Ni-58	7	0	4.53130E-03	293.0	end
Ni-60	7	0	1.68710E-03	293.0	end
Ni-61	7	0	7.21460E-05	293.0	end
Ni-62	7	0	2.26030E-04	293.0	end
Ni-64	7	0	5.60970E-05	293.0	end
Mn-55	7	0	1.15810E-03	293.0	end
Si-28	7	0	1.03290E-03	293.0	end
Si-29	7	0	5.04940E-05	293.0	end

Si-30	7	0	3.24030E-05	293.0	end
C	7	0	2.40780E-04	293.0	end
P-31	7	0	3.11240E-05	293.0	end
Co-59	7	0	1.14500E-04	293.0	end
Fe-54	8	0	3.63630E-03	293.0	end
Fe-56	8	0	5.49964E-02	293.0	end
Fe-57	8	0	1.24843E-03	293.0	end
Fe-58	8	0	1.62047E-04	293.0	end
Ni-58	8	0	5.28566E-03	293.0	end
Ni-60	8	0	1.96791E-03	293.0	end
Ni-61	8	0	8.41568E-05	293.0	end
Ni-62	8	0	2.63658E-04	293.0	end
Ni-64	8	0	6.54358E-05	293.0	end
Cr-50	8	0	7.56501E-04	293.0	end
Cr-52	8	0	1.40122E-02	293.0	end
Cr-53	8	0	1.55868E-03	293.0	end
Cr-54	8	0	3.80042E-04	293.0	end
Mn-55	8	0	1.25030E-03	293.0	end
Si-28	8	0	8.01962E-04	293.0	end
Si-29	8	0	3.92060E-05	293.0	end
Si-30	8	0	2.51595E-05	293.0	end
P-31	8	0	5.54400E-05	293.0	end
C	8	0	7.94260E-05	293.0	end
S-32	8	0	4.25282E-06	293.0	end
S-33	8	0	3.25504E-08	293.0	end
S-34	8	0	1.77356E-07	293.0	end
S-36	8	0	7.95715E-10	293.0	end
Mo-92	8	0	4.62144E-06	293.0	end
Mo-94	8	0	2.81913E-06	293.0	end
Mo-95	8	0	4.80079E-06	293.0	end
Mo-96	8	0	4.97759E-06	293.0	end
Mo-97	8	0	2.82043E-06	293.0	end
Mo-98	8	0	7.05364E-06	293.0	end
Mo-100	8	0	2.75861E-06	293.0	end
gd-152	9	0	1.3734e-05	293.	end
gd-154	9	0	1.4970e-04	293.	end
gd-155	9	0	1.0163e-03	293.	end
gd-156	9	0	1.4057e-03	293.	end
gd-157	9	0	1.0747e-03	293.	end
gd-158	9	0	1.7057e-03	293.	end
gd-160	9	0	1.5011e-03	293.	end
o	9	0	1.0300e-02	293.	end
h	10	0	6.6736e-02	293.	end
o	10	0	3.3368e-02	293.	end
Fe-54	11	0	3.52890E-03	293.0	end
Fe-56	11	0	5.55771E-02	293.0	end
Fe-57	11	0	1.32788E-03	293.0	end

```

Fe-58    11 0 2.00092E-04 293.0 end
Ni-58    11 0 4.91356E-03 293.0 end
Ni-60    11 0 1.89868E-03 293.0 end
Ni-61    11 0 8.61393E-05 293.0 end
Ni-62    11 0 2.64933E-04 293.0 end
Ni-64    11 0 7.81769E-05 293.0 end
Cr-50    11 0 7.71662E-04 293.0 end
Cr-52    11 0 1.49964E-02 293.0 end
Cr-53    11 0 1.70983E-03 293.0 end
Cr-54    11 0 4.26115E-04 293.0 end
Mn-55    11 0 1.34750E-03 293.0 end
Si-28    11 0 6.03671E-04 293.0 end
Si-29    11 0 3.07695E-05 293.0 end
Si-30    11 0 2.02293E-05 293.0 end
P-31     11 0 1.09350E-05 293.0 end
C        11 0 1.28910E-04 293.0 end
S-32     11 0 6.88000E-05 293.0 end
S-33     11 0 5.50400E-07 293.0 end
S-34     11 0 3.05617E-06 293.0 end
S-36     11 0 1.01389E-08 293.0 end
u-235    12 0 1.37927e-03 293. end
u-238    12 0 6.95660e-03 293. end
u-234    12 0 1.37927e-05 293. end
al       12 0 4.6784e-02 293. end
fe       12 0 2.4026e-04 293. end
Si-28    13 0 3.2030e-04 293. end
Si-29    13 0 1.5762e-05 293. end
Si-30    13 0 1.0018e-05 293. end
Cu-63    13 0 4.2531e-05 293. end
Cu-65    13 0 2.1204e-05 293. end
Mn-55    13 0 4.4222e-05 293. end
Mg-24    13 0 5.3145e-05 293. end
Mg-25    13 0 6.5666e-06 293. end
Mg-26    13 0 6.9630e-06 293. end
Cr-50    13 0 2.7254e-06 293. end
Cr-52    13 0 5.0932e-05 293. end
Cr-53    13 0 5.6973e-06 293. end
Cr-54    13 0 1.3935e-06 293. end
Zn       13 0 6.2364e-05 293. end
Ti-46    13 0 4.1925e-06 293. end
Ti-47    13 0 3.7670e-06 293. end
Ti-48    13 0 3.7465e-05 293. end
Ti-49    13 0 2.7348e-06 293. end
Ti-50    13 0 2.5975e-06 293. end
Al-27    13 0 5.8576e-02 293. end
Fe-54    13 0 1.2233e-05 293. end
Fe-56    13 0 1.8577e-04 293. end

```

```

Fe-57    13 0 4.3610e-06 293. end
Fe-58    13 0 6.4582e-07 293. end
h-2      14 0.0909          end
d2o      14              end
Al        15 0 5.88851E-02 293.0 end
Fe-54    15 0 1.36304E-05 293.0 end
Fe-56    15 0 2.13969E-04 293.0 end
Fe-57    15 0 4.94147E-06 293.0 end
Fe-58    15 0 6.57619E-07 293.0 end
Cu-63    15 0 1.06318E-04 293.0 end
Cu-65    15 0 4.73872E-05 293.0 end
Mn-55    15 0 1.48156E-04 293.0 end
Cr-50    15 0 6.80163E-06 293.0 end
Cr-52    15 0 1.31163E-04 293.0 end
Cr-53    15 0 1.48728E-06 293.0 end
Cr-54    15 0 3.70215E-06 293.0 end
Au-197   16 0 8.21250E-05 293.0 end
Al        16 0 5.93220E-02 293.0 end
u-235    16 0 1.37927E-11 293.0 end
H-1      17 0 6.67360E-02 293.0 end
O-16     17 0 3.33678E-02 293.0 end
u-235    18 0 1.37927e-03 293. end
u-238    18 0 6.95660e-03 293. end
u-234    18 0 1.37927e-05 293. end
al        18 0 4.6784e-02 293. end
fe        18 0 2.4026e-04 293. end
u-235    19 0 1.37927e-03 293. end
u-238    19 0 6.95660e-03 293. end
u-234    19 0 1.37927e-05 293. end
al        19 0 4.6784e-02 293. end
fe        19 0 2.4026e-04 293. end
end comp

'*****
'* Cell data          *
'*****

read celldata
latticecell symmslabcell pitch=1.500 3 fuelr=0.42447 1 gapr=0.42873 0 cladr=0.49037
2 end
latticecell squarepitch pitch=0.522 17 fuelr=0.038 19 cladr=0.076 13 end
'centrmdata pmc_cutoff=1e-12 end centrmdata
end celldata

'*****
'* Depletion          *
'*****

read depletion
1 19
end depletion

```

```

,
'*****
'* Timetable          *
'*****
,
,
,
'*****
'* Burn data          *
'*****
' power in units of [MW/MIU]
read burndata
,
' period 1, 1st half of operating cycle #1
power=0.000466 burn=0.042 down=0.08333 nlib=1 end
,
,
end burndata
,
,
'*****
'* Opus data          *
'*****
read opus
units= BEQUERELS symnuc= Tc-99m Tc-99 Mo-99 Nb-99 end
time=days
matl= 1 19 end
end opus
,
read model
read param gen=1000 npg=80000 nsk=100 tme=0.0 end param
read geom
,
unit 1
com='miniplaca n - parte inferior '
cuboid 18 1 2p0.0450 2.666 -2.666 2p2.1
cuboid 13 1 2p0.076 2.666 -2.666 2p2.1
,
unit 2
com='reflector inferior alumina'
cylinder 4 1 0.42350 9.1 0
cylinder 0 1 0.42873 9.1 0
cylinder 2 1 0.49037 9.1 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 9.1 0
,
unit 3
com='fuel inferior part'

```

```

cylinder 1 1 0.42447 1.67 0
cylinder 0 1 0.42873 1.67 0
cylinder 2 1 0.49037 1.67 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 1.67 0
,
unit 4
com='miniplaca n - parte central'
cuboid 19 1 2p0.0450 2p0.568 2p2.1
cuboid 13 1 2p0.076 2p0.568 2p2.1
,
unit 5
com='fuel inferior part novo'
cylinder 1 1 0.42447 22.9320 0
cylinder 0 1 0.42873 22.9320 0
cylinder 2 1 0.49037 22.9320 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 22.9320 0
,
unit 6
com='guide tube fuel inferior part novo'
cylinder 3 1 0.565 22.9320 0
cylinder 6 1 0.600 22.9320 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 22.9320 0
,
unit 7
com='Ag-In-Cd control rod novo'
cylinder 5 1 0.4160 22.9320 0
cylinder 0 1 0.42873 22.9320 0
cylinder 2 1 0.49037 22.9320 0
cylinder 3 1 0.56500 22.9320 0
cylinder 2 1 0.60000 22.9320 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 22.9320 0
,
unit 8
com='reflector superior alumina'
cylinder 4 1 0.42350 5.4 0
cylinder 0 1 0.42873 5.4 0
cylinder 2 1 0.49037 5.4 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 5.4 0
,
unit 9
com='reflector superior spacer tube'
cylinder 0 1 0.36500 10.96 0
cylinder 7 1 0.42500 10.96 0
cylinder 0 1 0.42873 10.96 0
cylinder 2 1 0.49037 10.96 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 10.96 0
,

```

```

unit 10
com='miniplaca n - parte superior'
cuboid 18 1 2p0.0450 2.666 -2.666 2p2.1
cuboid 13 1 2p0.076 2.666 -2.666 2p2.1
,

unit 12
com='miniplaca n - completa'
array 1 0 0 0
,

unit 11
com='guide tube reflector inferior'
cylinder 3 1 0.565 9.1 0
cylinder 6 1 0.600 9.1 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 9.1 0
,

unit 13
com='guide tube fuel inferior part'
cylinder 3 1 0.565 1.67 0
cylinder 6 1 0.600 1.67 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 1.67 0
,

unit 27
com='guide tube reflector superior alumina'
cylinder 3 1 0.565 5.4 0
cylinder 6 1 0.6 5.4 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 5.4 0
,

unit 28
com='Ag-In-Cd control rod'
cylinder 5 1 0.4160 5.4 0
cylinder 0 1 0.42873 5.4 0
cylinder 2 1 0.49037 5.4 0
cylinder 3 1 0.565 5.4 0
cylinder 2 1 0.6 5.4 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 5.4 0
,

unit 30
com='guide tube reflector superior'
cylinder 3 1 0.565 10.96 0
cylinder 6 1 0.6 10.96 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 10.96 0
,

unit 31
com='Ag-In-Cd control rod'
cylinder 5 1 0.4160 10.96 0
cylinder 0 1 0.42873 10.96 0
cylinder 2 1 0.49037 10.96 0

```

```

cylinder 3 1 0.565 10.96 0
cylinder 2 1 0.6 10.96 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 10.96 0
,
unit 32
com='water reflector superior'
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 10.96 0
,
unit 33
com='alumina inferior with gadolinium oxide rod'
cylinder 9 1 0.42873 9.1 0
cylinder 2 1 0.49037 9.1 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 9.1 0
,
unit 34
com='fuel inferior with gadolinium oxide rod'
cylinder 9 1 0.42873 53.17 0
cylinder 2 1 0.49037 53.17 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 53.17 0
,
unit 35
com='fuel superior with gadolinium oxide rod'
cylinder 9 1 0.42873 1.67 0
cylinder 2 1 0.49037 1.67 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 1.67 0
,
unit 36
com='reflector superior alumina with gadolinium oxide rod'
cylinder 9 1 0.42873 5.4 0
cylinder 2 1 0.49037 5.4 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 5.4 0
,
unit 37
com='reflector superior spacer tube with gadolinium oxide rod'
cylinder 9 1 0.42873 10.96 0
cylinder 2 1 0.49037 10.96 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 10.96 0
,
unit 38
com='stainless steel reflector'
cuboid 10 1 4.816 -4.816 25.4 -25.4 71.50 0
,
unit 39
com='matrix plate'
cuboid 8 1 4.20 -4.20 29.4 -29.4 2.2 0
,
unit 46

```

```

com='fuel inferior part'
cylinder 1 1 0.42447 30.2380 0
cylinder 0 1 0.42873 30.2380 0
cylinder 2 1 0.49037 30.2380 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 30.2380 0
,

unit 47
com='guide tube reflector inferior'
cylinder 3 1 0.565 30.2380 0
cylinder 6 1 0.600 30.2380 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 30.2380 0
,

unit 70
com='bottom plug of control rod fuel upper part'
cylinder 2 1 0.49037 1.67 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 1.67 0
,

global unit 72
com='stainless steel reflector, matrix plate and water reflector'
array 2 0 0 0
replicate 3 1 8.40 0.29037 9.90 9.90 0 0 1
replicate 8 1 0 0 0 0 0 2.2 1
replicate 3 1 30.0 30.0 30.0 30.0 30.0 30.0 1
hole 39 -4.49037 19.50 -2.2
hole 12 -1.5 19.50 37.7
end geom
read array
ara=1 nux=1 nuy=3 nuz=1
fill 1 4 10
end fill
ara=2 nux=28 nuy=26 nuz=6
com='UCR3D critical configuration with stainless steel reflector - case 2'
fill
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 11 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 11 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2

```

3r3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3r3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3r3	3	3	13	3	3	3	13	3	3	3	3	3	3	3	70	3	3	3	70	3	3	3	3
3r3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3r3	13	3	3	3	13	3	3	3	13	3	3	3	3	70	3	3	3	70	3	3	3	70	3
3r3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3r3	3	3	13	3	3	3	13	3	3	3	3	3	3	3	70	3	3	3	70	3	3	3	3

[illegible]

[illegible]

```

3r9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9
3r9  31 9  9  9 31  9  9  9 31  9  9  9  9 30  9  9  9 30  9  9  9 30  9  9  9
3r9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9
3r9  9  9 31  9  9  9 31  9  9  9  9  9  9  9  9 30  9  9  9 30  9  9  9  9  9
3r9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9
3r9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9  9
end fill
end array
end data
end model
end

```

G_____

Input do Programa CITATION

G.1 Caso 1

UNIDADE CRITICA – NUCLEO 28 X 26 VARETAS – 3D – 4 GRUPOS DE ENERGIA.

BENCHAMRK POSCAO CRITICA.

001

[illegible]

003

0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	1
0.0001					0.0001						
					1.E-04						1.00

004

20	30.0	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5
1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5
1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5
1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5
1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	20	30.0

20	30.0	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5
1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5
1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5
1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5
1	1.5	1	1.5	1	1.5	20	30.0				
16	24.0	4	5.4	9	12.06	1	1.67	12	16.75	1	1.67
18	22.69	6	9.1	2	2.2	12	18.0				

005

[illegible]

3	5	5	5	5	5	2	5	5	5	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	8	5	5	5	5	8
5	5	5	5	5	3																				
3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	3																				
3	5	5	5	2	5	5	5	2	5	5	5	2	5	5	5	5	5	8	5	5	5	8	5	5	
5	8	5	5	5	3																				
3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	3																				
3	5	5	5	5	5	2	5	5	5	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	8	5	5	5	8	
5	5	5	5	5	3																				
3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	3																				
3	5	5	5	2	5	5	5	2	5	5	5	2	5	5	5	5	5	8	5	5	5	8	5	5	
5	8	5	5	5	3																				
3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	3																				
3	5	5	5	5	5	2	5	5	5	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	8	5	5	5	8	
5	5	5	5	5	3																				
3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	3																				
3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	3																				
3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	3																				
3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	3																				
3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	3																				
3	5	5	5	5	5	8	5	5	5	8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	2	5	5	5	2	
5	5	5	5</																						

```

5 5 5 5 5 3
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3
3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 2 4 4 4 2 4 4 4 4 4 4 4 8 4 4 4 8
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 2 4 4 4 2 4 4 4 2 4 4 4 8 4 4 4 8 4 4
4 8 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 2 4 4 4 2 4 4 4 4 4 4 4 8 4 4 4 8
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 2 4 4 4 2 4 4 4 2 4 4 4 8 4 4 4 8 4 4
4 8 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 2 4 4 4 2 4 4 4 4 4 4 4 8 4 4 4 8
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 4 8 4 4 4 8 4 4 4 4 4 4 2 4 4 4 2
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 8 4 4 4 8 4 4 4 4 4 4 2 4 4 4 2
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 3

```

```

3 4 4 4 8 4 4 4 8 4 4 4 8 4 4 4 4 2 4 4 4 2 4 4
4 2 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 8 4 4 4 8 4 4 4 4 4 4 4 2 4 4 4 2
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 3
3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 3
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3
3 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 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 8 1 1 1 8
1 1 1 1 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 8 1 1 1 8 1 1
1 8 1 1 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 8 1 1 1 8
1 1 1 1 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 8 1 1 1 8 1 1
1 8 1 1 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 8 1 1 1 8
1 1 1 1 1 3
3 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 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 1 1 8 1 1 1 8 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2
1 1 1 1 1 3
3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

```

[illegible]

```

3 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 1 1 3
3 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 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 1 1 9 1 1 1 9 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2
1 1 1 1 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 9 1 1 1 9 1 1 1 9 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1
1 2 1 1 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 1 1 9 1 1 1 9 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2
1 1 1 1 1 3
3 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 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 9 1 1 1 9 1 1 1 9 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1
1 2 1 1 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 1 1 9 1 1 1 9 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2
1 1 1 1 1 3
3 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 1 3
3 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 1 3
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3
3 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 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 8 1 1 1 8
1 1 1 1 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 8 1 1 1 8 1 1
1 8 1 1 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 8 1 1 1 8
1 1 1 1 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 8 1 1 1 8 1 1
1 8 1 1 1 3
3 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 1 1 3
3 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 8 1 1 1 8
1 1 1 1 1 3
3 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 1 1 3
3 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 1 1 3
3 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 1 1 3
3 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 1 1 3
3 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2
1 1 1 1 1 3
3 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 1 1 3
3 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1
1 2 1 1 1 3
3 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 1 1 3
3 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2
1 1 1 1 1 3
3 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 1 1 3
3 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1
1 2 1 1 1 3
3 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 1 1 3
3 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2
1 1 1 1 1 3
3 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 1 1 3
3 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 1 1 3
3 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 9 1 1 1 9
1 1 1 1 1 3

```

3	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	1	1	1	3																		
3	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	9	1	1	1	9	1	1
1	9	1	1	1	3																		
3	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	1	1	1	3																		
3	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	9
1	1	1	1	1	3																		
3	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	1	1	1	3																		
3	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	9	1	1	1	9	1	1
1	9	1	1	1	3																		
3	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	1	1	1	3																		
3	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	9
1	1	1	1	1	3																		
3	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	1	1	1	3																		
3	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	9
1	1	1	1	1	3																		
3	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	1	1	1	3																		
3	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	1	1	1	3																		
3	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	1	1	1	3																		
3	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	1	1	1	3																		
3	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2
1	1	1	1	1	3																		
3	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	1	1	1	3																		

```

3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3
3 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 1 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2
1 1 1 1 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1
1 2 1 1 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2
1 1 1 1 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1
1 2 1 1 1 3
3 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 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2
1 1 1 1 1 3
3 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 1 3
3 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1
1 2 1 1 1 3

```

3	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	1	1	1	3																		
3	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2
1	1	1	1	1	3																		
3	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	1	1	1	3																		
3	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	1	1	1	3																		
3	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	1	1	1	3																		
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3																		
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3																		
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	3																		
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	3																		
3	4	4	4	4	4	2	4	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	2
4	4	4	4	4	3																		
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	3																		
3	4	4	4	4	2	4	4	2	4	4	4	2	4	4	4	4	2	4	4	4	2	4	4
4	2	4	4	4	3																		
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	3																		
3	4	4	4	4	4	2	4	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	2	4
4	4	4	4	4	3																		
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	3																		
3	4	4	4	4	2	4	4	2	4	4	4	2	4	4	4	4	2	4	4	4	2	4	4
4	2	4	4	4	3																		

[illegible]

[illegible]

2	1	1.81314E+00	4.12828E-04	0.0
0.0		1.06313E-01	6.55990E-04	2.90923E-11
2	2	1.36623E+00	5.88066E-05	0.0
0.0		0.0	1.44687E-01	1.57612E-05
2	3	5.19085E-01	1.53708E-03	0.0
0.0		0.0	0.0	1.30329E-01
2	4	1.44355E-01	2.70050E-02	0.0
0.0		0.0	0.0	0.0
3	1	2.06195E+00	4.11337E-04	0.0
0.0		1.03186E-01	6.47910E-04	0.0
3	2	1.06091E+00	1.04579E-05	0.0
0.0		0.0	1.60193E-01	1.75066E-05
3	3	6.04122E-01	9.84260E-04	0.0
0.0		0.0	0.0	1.55797E-01
3	4	1.50315E-01	1.89766E-02	0.0
0.0		0.0	0.0	0.0
4	1	1.93356E+00	6.33505E-04	0.0
0.0		7.53432E-02	4.04038E-04	1.54435E-09
4	2	9.35915E-01	1.16339E-04	0.0
0.0		0.0	9.60144E-02	1.02346E-05
4	3	6.59504E-01	1.86492E-03	0.0
0.0		0.0	0.0	9.08401E-02
4	4	2.31856E-01	2.94188E-02	0.0
0.0		0.0	0.0	0.0
5	1	1.30979E-01	6.75312E-04	0.0
0.0		4.64335E-02	2.24038E-04	1.73707E-09
5	2	2.88479E-01	1.33034E-04	0.0
0.0		0.0	5.71280E-02	5.94012E-06
5	3	4.50989E-01	2.49274E-03	0.0
0.0		0.0	0.0	5.57141E-02
5	4	9.70551E-01	3.56150E-02	0.0
0.0		0.0	0.0	0.0
6	1	1.68466E+00	6.16060E-03	0.0
0.0		2.28057E-02	1.29159E-05	7.26108E-09
6	2	5.31177E-01	1.81036E-03	0.0
0.0		0.0	5.69229E-03	2.02740E-12
6	3	7.58961E-01	1.16411E-02	0.0
0.0		0.0	0.0	1.38811E-03
6	4	6.05090E-01	1.65166E-01	0.0
0.0		0.0	0.0	0.0
7	1	2.11117E+00	4.35910E-04	0.0
0.0		1.02895E-01	6.46435E-04	0.0
7	2	1.09121E+00	1.04150E-05	0.0
0.0		0.0	1.59152E-01	1.73904E-05
7	3	5.83681E-01	1.01085E-03	0.0
0.0		0.0	0.0	1.61336E-01
7	4	1.50084E-01	1.89105E-02	0.0

0.0		0.0	0.0	0.0
8	1	1.58437E-01	1.38214E-03	0.0
0.0		8.57395E-02	4.42953E-04	1.23286E-05
8	2	3.40852E-01	6.45826E-03	0.0
0.0		0.0	9.13838E-02	9.86739E-06
8	3	1.42134E+00	1.45528E-01	0.0
0.0		0.0	0.0	7.83881E-02
8	4	2.78661E+00	4.29268E-01	0.0
0.0		0.0	0.0	0.0
9	1	2.13055E+00	7.85860E-04	0.0
0.0		7.94938E-02	4.39714E-04	6.18748E-09
9	2	9.95932E-01	3.51492E-04	0.0
0.0		0.0	9.31166E-02	9.93682E-06
9	3	4.69344E-01	5.91843E-03	0.0
0.0		0.0	0.0	8.39044E-02
9	4	1.75600E-01	7.91870E-02	0.0
0.0		0.0	0.0	0.0

7.64948E-01 2.34891E-01 1.60725E-04 3.62475E-11

012

1	1	1	1	UO2
2	2	2	-1	TUBO-GUIA
3	3	3	-1	REFL.LATERAL
4	4	4	-1	AL2O3
5	5	5	-1	TUBO ESPAC.
6	6	6	-1	PL. SUPORTE
7	7	7	-1	REFL.INF.
8	8	8	-1	AG-IN-CD
9	9	9	-1	TAMPAO BC

999

H

Input do Programa SCALE 6.0

H.1 Caso 1

```
=csas5
Caso 1
ce_v7
read comp
U-234      1 0 9.45280E-06 293.0 end
U-235      1 0 9.99100E-04 293.0 end
U-238      1 0 2.16910E-02 293.0 end
O-16       1 0 4.54640E-02 293.0 end
O-17       1 0 1.72830E-05 293.0 end
Mg-24      1 0 3.38580E-06 293.0 end
Mg-25      1 0 4.28640E-07 293.0 end
Mg-26      1 0 4.71930E-07 293.0 end
Fe-54      1 0 2.35490E-07 293.0 end
Fe-56      1 0 3.72400E-06 293.0 end
Fe-57      1 0 8.93240E-08 293.0 end
Fe-58      1 0 1.13690E-08 293.0 end
B-10       1 0 2.25610E-08 293.0 end
B-11       1 0 9.08090E-08 293.0 end
Mo-92      1 0 1.89580E-08 293.0 end
Mo-94      1 0 1.18170E-08 293.0 end
Mo-95      1 0 2.03380E-08 293.0 end
Mo-96      1 0 2.13090E-08 293.0 end
Mo-97      1 0 1.22000E-08 293.0 end
Mo-98      1 0 3.08560E-08 293.0 end
Mo-100     1 0 1.23020E-08 293.0 end
Co-59      2 0 1.74020E-04 293.0 end
Cr-50      2 0 7.61900E-04 293.0 end
Cr-52      2 0 1.41120E-02 293.0 end
Cr-53      2 0 1.56980E-03 293.0 end
Cr-54      2 0 3.82760E-04 293.0 end
Fe-54      2 0 3.57370E-03 293.0 end
Fe-56      2 0 5.40490E-02 293.0 end
```

Fe-57	2	0	1.22690E-03	293.0	end
Fe-58	2	0	1.59260E-04	293.0	end
Mn-55	2	0	1.46450E-03	293.0	end
Mo-92	2	0	1.30930E-05	293.0	end
Mo-94	2	0	7.98750E-06	293.0	end
Mo-95	2	0	1.36020E-05	293.0	end
Mo-96	2	0	1.41030E-05	293.0	end
Mo-97	2	0	7.99120E-06	293.0	end
Mo-98	2	0	1.99850E-05	293.0	end
Mo-100	2	0	7.81610E-06	293.0	end
Ni-58	2	0	5.62940E-03	293.0	end
Ni-60	2	0	2.09590E-03	293.0	end
Ni-61	2	0	8.96300E-05	293.0	end
Ni-62	2	0	2.80810E-04	293.0	end
Ni-64	2	0	6.96920E-05	293.0	end
P-31	2	0	4.00400E-05	293.0	end
S-32	2	0	1.48850E-05	293.0	end
S-33	2	0	1.13930E-07	293.0	end
S-34	2	0	6.20750E-07	293.0	end
S-36	2	0	2.78500E-09	293.0	end
Si-28	2	0	6.28990E-04	293.0	end
Si-29	2	0	3.07500E-05	293.0	end
Si-30	2	0	1.97320E-05	293.0	end
C	2	0	1.12390E-04	293.0	end
H-1	3	0	6.67360E-02	293.0	end
O-16	3	0	3.33678E-02	293.0	end
Al	4	0	4.47440E-02	293.0	end
O-16	4	0	6.70910E-02	293.0	end
O-17	4	0	2.55040E-05	293.0	end
Ag-107	5	0	2.29690E-02	293.0	end
Ag-109	5	0	2.00260E-02	293.0	end
In-113	5	0	3.36060E-04	293.0	end
In-115	5	0	7.51570E-03	293.0	end
Cd-106	5	0	3.15900E-05	293.0	end
Cd-108	5	0	2.27870E-05	293.0	end
Cd-110	5	0	3.32080E-04	293.0	end
Cd-111	5	0	3.30150E-04	293.0	end
Cd-112	5	0	6.23260E-04	293.0	end
Cd-113	5	0	3.17460E-04	293.0	end
Cd-114	5	0	7.47300E-04	293.0	end
Cd-116	5	0	1.96280E-04	293.0	end
C	5	0	1.50520E-03	293.0	end
S-32	5	0	1.78390E-04	293.0	end
S-33	5	0	1.47210E-06	293.0	end
S-34	5	0	7.92430E-06	293.0	end
S-36	5	0	2.26290E-08	293.0	end
O-16	5	0	1.76960E-03	293.0	end

O-17	4	0	6.72710E-05	293.0	end
Fe-54	6	0	3.44894E-03	293.0	end
Fe-56	6	0	5.21628E-02	293.0	end
Fe-57	6	0	1.18411E-03	293.0	end
Fe-58	6	0	1.53698E-04	293.0	end
Ni-58	6	0	6.27853E-03	293.0	end
Ni-60	6	0	2.33757E-03	293.0	end
Ni-61	6	0	9.99650E-05	293.0	end
ni-62	6	0	3.13183E-04	293.0	end
Ni-64	6	0	7.77273E-05	293.0	end
Cr-50	6	0	7.38069E-04	293.0	end
Cr-52	6	0	1.36708E-02	293.0	end
Cr-53	6	0	1.52070E-03	293.0	end
Cr-54	6	0	3.70782E-04	293.0	end
Si-28	6	0	6.12655E-04	293.0	end
Si-29	6	0	2.99512E-05	293.0	end
Si-30	6	0	1.92205E-05	293.0	end
Mn-55	6	0	1.15010E-03	293.0	end
C	6	0	8.89680E-05	293.0	end
P-31	6	0	4.50000E-05	293.0	end
Fe-54	7	0	3.74870E-03	293.0	end
Fe-56	7	0	5.66970E-02	293.0	end
Fe-57	7	0	1.28700E-03	293.0	end
Fe-58	7	0	1.67060E-04	293.0	end
Cr-50	7	0	7.59840E-04	293.0	end
Cr-52	7	0	1.40740E-02	293.0	end
Cr-53	7	0	1.56560E-03	293.0	end
Cr-54	7	0	3.81720E-04	293.0	end
Ni-58	7	0	4.53130E-03	293.0	end
Ni-60	7	0	1.68710E-03	293.0	end
Ni-61	7	0	7.21460E-05	293.0	end
Ni-62	7	0	2.26030E-04	293.0	end
Ni-64	7	0	5.60970E-05	293.0	end
Mn-55	7	0	1.15810E-03	293.0	end
Si-28	7	0	1.03290E-03	293.0	end
Si-29	7	0	5.04940E-05	293.0	end
Si-30	7	0	3.24030E-05	293.0	end
C	7	0	2.40780E-04	293.0	end
P-31	7	0	3.11240E-05	293.0	end
Co-59	7	0	1.14500E-04	293.0	end
Fe-54	8	0	3.63630E-03	293.0	end
Fe-56	8	0	5.49964E-02	293.0	end
Fe-57	8	0	1.24843E-03	293.0	end
Fe-58	8	0	1.62047E-04	293.0	end
Ni-58	8	0	5.28566E-03	293.0	end
Ni-60	8	0	1.96791E-03	293.0	end
Ni-61	8	0	8.41568E-05	293.0	end

Ni-62	8	0	2.63658E-04	293.0	end
Ni-64	8	0	6.54358E-05	293.0	end
Cr-50	8	0	7.56501E-04	293.0	end
Cr-52	8	0	1.40122E-02	293.0	end
Cr-53	8	0	1.55868E-03	293.0	end
Cr-54	8	0	3.80042E-04	293.0	end
Mn-55	8	0	1.25030E-03	293.0	end
Si-28	8	0	8.01962E-04	293.0	end
Si-29	8	0	3.92060E-05	293.0	end
Si-30	8	0	2.51595E-05	293.0	end
P-31	8	0	5.54400E-05	293.0	end
C	8	0	7.94260E-05	293.0	end
S-32	8	0	4.25282E-06	293.0	end
S-33	8	0	3.25504E-08	293.0	end
S-34	8	0	1.77356E-07	293.0	end
S-36	8	0	7.95715E-10	293.0	end
Mo-92	8	0	4.62144E-06	293.0	end
Mo-94	8	0	2.81913E-06	293.0	end
Mo-95	8	0	4.80079E-06	293.0	end
Mo-96	8	0	4.97759E-06	293.0	end
Mo-97	8	0	2.82043E-06	293.0	end
Mo-98	8	0	7.05364E-06	293.0	end
Mo-100	8	0	2.75861E-06	293.0	end
gd-152	9	0	1.3734e-05	293.	end
gd-154	9	0	1.4970e-04	293.	end
gd-155	9	0	1.0163e-03	293.	end
gd-156	9	0	1.4057e-03	293.	end
gd-157	9	0	1.0747e-03	293.	end
gd-158	9	0	1.7057e-03	293.	end
gd-160	9	0	1.5011e-03	293.	end
o	9	0	1.0300e-02	293.	end
h	10	0	6.6736e-02	293.	end
o	10	0	3.3368e-02	293.	end
Fe-54	11	0	3.52890E-03	293.0	end
Fe-56	11	0	5.55771E-02	293.0	end
Fe-57	11	0	1.32788E-03	293.0	end
Fe-58	11	0	2.00092E-04	293.0	end
Ni-58	11	0	4.91356E-03	293.0	end
Ni-60	11	0	1.89868E-03	293.0	end
Ni-61	11	0	8.61393E-05	293.0	end
Ni-62	11	0	2.64933E-04	293.0	end
Ni-64	11	0	7.81769E-05	293.0	end
Cr-50	11	0	7.71662E-04	293.0	end
Cr-52	11	0	1.49964E-02	293.0	end
Cr-53	11	0	1.70983E-03	293.0	end
Cr-54	11	0	4.26115E-04	293.0	end
Mn-55	11	0	1.34750E-03	293.0	end

```

Si-28    11 0 6.03671E-04 293.0 end
Si-29    11 0 3.07695E-05 293.0 end
Si-30    11 0 2.02293E-05 293.0 end
P-31     11 0 1.09350E-05 293.0 end
C        11 0 1.28910E-04 293.0 end
S-32     11 0 6.88000E-05 293.0 end
S-33     11 0 5.50400E-07 293.0 end
S-34     11 0 3.05617E-06 293.0 end
S-36     11 0 1.01389E-08 293.0 end
u-235    12 0 1.5124e-03 293. end
u-238    12 0 6.05298-03 293. end
u-234    12 0 1.5124e-05 293. end
al       12 0 4.6784e-02 293. end
fe       12 0 2.4026e-04 293. end
Si-28    13 0 3.2030e-04 293. end
Si-29    13 0 1.5762e-05 293. end
Si-30    13 0 1.0018e-05 293. end
Cu-63    13 0 4.2531e-05 293. end
Cu-65    13 0 2.1204e-05 293. end
Mn-55    13 0 4.4222e-05 293. end
Mg-24    13 0 5.3145e-05 293. end
Mg-25    13 0 6.5666e-06 293. end
Mg-26    13 0 6.9630e-06 293. end
Cr-50    13 0 2.7254e-06 293. end
Cr-52    13 0 5.0932e-05 293. end
Cr-53    13 0 5.6973e-06 293. end
Cr-54    13 0 1.3935e-06 293. end
Zn       13 0 6.2364e-05 293. end
Ti-46    13 0 4.1925e-06 293. end
Ti-47    13 0 3.7670e-06 293. end
Ti-48    13 0 3.7465e-05 293. end
Ti-49    13 0 2.7348e-06 293. end
Ti-50    13 0 2.5975e-06 293. end
Al-27    13 0 5.8576e-02 293. end
Fe-54    13 0 1.2233e-05 293. end
Fe-56    13 0 1.8577e-04 293. end
Fe-57    13 0 4.3610e-06 293. end
Fe-58    13 0 6.4582e-07 293. end
end comp
read param gen=4000 npg=15000 nsk=500 tme=0.0 end param
read geom
,
unit 2
com='reflector inferior alumina'
cylinder 4 1 0.42350 9.1 0
cylinder 0 1 0.42873 9.1 0
cylinder 2 1 0.49037 9.1 0

```

```

cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 9.1 0
,
unit 3
com='fuel inferior part'
cylinder 1 1 0.42447 22.69 0
cylinder 0 1 0.42873 22.69 0
cylinder 2 1 0.49037 22.69 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 22.69 0
,
unit 4
com='fuel superior part'
cylinder 1 1 0.42447 1.67 0
cylinder 0 1 0.42873 1.67 0
cylinder 2 1 0.49037 1.67 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 1.67 0
,
unit 5
com='fuel inferior part novo'
cylinder 1 1 0.42447 12.06 0
cylinder 0 1 0.42873 12.06 0
cylinder 2 1 0.49037 12.06 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 12.06 0
,
unit 6
com='guide tube fuel inferior part novo'
cylinder 3 1 0.565 12.06 0
cylinder 6 1 0.600 12.06 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 12.06 0
,
unit 7
com='Ag-In-Cd control rod novo'
cylinder 5 1 0.4160 12.06 0
cylinder 0 1 0.42873 12.06 0
cylinder 2 1 0.49037 12.06 0
cylinder 3 1 0.56500 12.06 0
cylinder 2 1 0.6 12.06 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 12.06 0
,
unit 8
com='reflector superior alumina'
cylinder 4 1 0.42350 5.4 0
cylinder 0 1 0.42873 5.4 0
cylinder 2 1 0.49037 5.4 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 5.4 0
,
unit 9
com='reflector superior spacer tube'

```

```

cylinder 0 1 0.36500 10.96 0
cylinder 7 1 0.42500 10.96 0
cylinder 0 1 0.42873 10.96 0
cylinder 2 1 0.49037 10.96 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 10.96 0
,
unit 11
com='guide tube reflector inferior '
cylinder 3 1 0.565 9.1 0
cylinder 6 1 0.6 9.1 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 9.1 0
,
unit 12
com='water reflector inferior '
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 9.1 0
,
unit 13
com='guide tube fuel inferior part '
cylinder 3 1 0.565 22.69 0
cylinder 6 1 0.6 22.69 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 22.69 0
,
unit 14
com='water fuel inferior part '
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 53.17 0
,
unit 15
com='guide tube fuel upper part '
cylinder 3 1 0.565 1.67 0
cylinder 6 1 0.6 1.67 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 1.67 0
,
unit 16
com='bottom plug of control rod fuel upper part '
cylinder 2 1 0.49037 1.67 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 1.67 0
,
unit 17
com='water fuel upper part '
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 1.67 0
,
unit 18
com='reflector inferior with stainless steel rod '
cylinder 11 1 0.4750 9.1 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 9.1 0
,
unit 19

```

```

com='fuel inferior part with stainless steel rod'
cylinder 11 1 0.4750 53.17 0
cuboid    3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 53.17 0
,

unit 20
com='fuel upper part with stainless steel rod'
cylinder 11 1 0.4750 1.67 0
cuboid    3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 1.67 0
,

unit 21
com='reflector superior alumina with stainless steel rod'
cylinder 11 1 0.4750 5.4 0
cuboid    3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 5.4 0
,

unit 22
com='reflector superior with stainless steel rod'
cylinder 11 1 0.4750 10.96 0
cuboid    3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 10.96 0
,

unit 27
com='guide tube reflector superior alumina'
cylinder 3 1 0.565 5.4 0
cylinder 6 1 0.6 5.4 0
cuboid    3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 5.4 0
,

unit 28
com='Ag-In-Cd control rod'
cylinder 5 1 0.4160 5.4 0
cylinder 0 1 0.42873 5.4 0
cylinder 2 1 0.49037 5.4 0
cylinder 3 1 0.565 5.4 0
cylinder 2 1 0.6 5.4 0
cuboid    3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 5.4 0
,

unit 29
com='water reflector superior alumina'
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 5.4 0
,

unit 30
com='guide tube reflector superior'
cylinder 3 1 0.565 10.96 0
cylinder 6 1 0.6 10.96 0
cuboid    3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 10.96 0
,

unit 31
com='Ag-In-Cd control rod'
cylinder 5 1 0.4160 10.96 0

```

```

cylinder 0 1 0.42873 10.96 0
cylinder 2 1 0.49037 10.96 0
cylinder 3 1 0.565 10.96 0
cylinder 2 1 0.6 10.96 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 10.96 0
,
unit 32
com='water reflector superior'
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 10.96 0
,
unit 33
com='alumina inferior with gadolinium oxide rod'
cylinder 9 1 0.42873 9.1 0
cylinder 2 1 0.49037 9.1 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 9.1 0
,
unit 34
com='fuel inferior with gadolinium oxide rod'
cylinder 9 1 0.42873 53.17 0
cylinder 2 1 0.49037 53.17 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 53.17 0
,
unit 35
com='fuel superior with gadolinium oxide rod'
cylinder 9 1 0.42873 1.67 0
cylinder 2 1 0.49037 1.67 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 1.67 0
,
unit 36
com='reflector superior alumina with gadolinium oxide rod'
cylinder 9 1 0.42873 5.4 0
cylinder 2 1 0.49037 5.4 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 5.4 0
,
unit 37
com='reflector superior spacer tube with gadolinium oxide rod'
cylinder 9 1 0.42873 10.96 0
cylinder 2 1 0.49037 10.96 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 10.96 0
,
unit 38
com='B4stainless steel reflector\B4
cuboid 10 1 4.816 -4.816 25.4 -25.4 71.50 0
,
unit 39
com='B4matrix plate\B4
cuboid 8 1 4.20 -4.20 29.4 -29.4 2.2 0

```

```

,

unit 40
com=\B4parte ativa da miniplaca\B4
cuboid 12 1 0.0380 -0.0380 0.75000 -0.75000 4.00 0.0
cuboid 13 1 0.0760 -0.0760 0.75000 -0.75000 4.00 0.0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 4.00 0.0
,

unit 41
com=\B4parte ativa da miniplaca restante\B4
cuboid 12 1 0.0380 -0.0380 0.65000 -0.65000 4.00 0.0
cuboid 13 1 0.0760 -0.0760 0.65000 -0.65000 4.00 0.0
cuboid 13 1 0.0760 -0.0760 0.75000 -0.75000 4.00 0.0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 4.00 0.0
,

unit 42
com=\B4alum\EDnio - miniplaca\B4
cuboid 13 1 0.0760 -0.0760 0.75000 -0.75000 4.00 0.0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 4.00 0.0
,

unit 43
com=\B4alum\EDnio + \Elgua inferior - miniplaca\B4
cuboid 13 1 0.0760 -0.0760 0.45000 -0.45000 4.00 0.0
cuboid 3 1 0.0760 -0.0760 0.75000 -0.75000 4.00 0.0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 4.00 0.0
,

unit 44
com=\B4alum\EDnio + \Elgua superior - miniplaca\B4
cuboid 13 1 0.0760 -0.0760 0.55000 -0.55000 4.00 0.0
cuboid 3 1 0.0760 -0.0760 0.75000 -0.75000 4.00 0.0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 4.00 0.0
,

unit 45
com=\B4\Elgua\B4
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 9.10 0.0
,

unit 58
com='guide tube fuel inferior part'
cylinder 3 1 0.565 1.67 0
cylinder 6 1 0.6 1.67 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 1.67 0
,

unit 59
com='fuel superior part'
cylinder 1 1 0.42447 1.67 0
cylinder 0 1 0.42873 1.67 0
cylinder 2 1 0.49037 1.67 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 1.67 0

```

```

,

unit 60
com='fuel inferior part'
cylinder 1 1 0.42447 16.75 0
cylinder 0 1 0.42873 16.75 0
cylinder 2 1 0.49037 16.75 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 16.75 0
,

unit 61
com='guide tube fuel inferior part'
cylinder 3 1 0.565 16.75 0
cylinder 6 1 0.6 16.75 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 16.75 0
,

unit 62
com=\B4\Elgua\B4
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 22.69 0.0
,

unit 63
com=\B4\Elgua\B4
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 16.75 0.0
,

unit 64
com=\B4\Elgua\B4
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 1.67 0.0
,

unit 65
com=\B4\Elgua\B4
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 21.32026 0.0
,

unit 66
com=\B4\Elgua\B4
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 5.40 0.0
,

unit 67
com=\B4\Elgua\B4
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 10.96 0.0
,

unit 68
com='Ag-In-Cd control rod'
cylinder 5 1 0.4160 1.67 0
cylinder 0 1 0.42873 1.67 0
cylinder 2 1 0.49037 1.67 0
cylinder 3 1 0.565 1.67 0
cylinder 2 1 0.6 1.67 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 1.67 0
,

```



```

unit 69
com='Ag-In-Cd control rod'
cylinder 5 1 0.4160 16.75 0
cylinder 0 1 0.42873 16.75 0
cylinder 2 1 0.49037 16.75 0
cylinder 3 1 0.565 16.75 0
cylinder 2 1 0.6 16.75 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 16.75 0
,

unit 70
com='bottom plug of control rod fuel upper part'
cylinder 2 1 0.49037 1.67 0
cuboid 3 1 0.75000 -0.75000 0.75000 -0.75000 1.67 0
,

global unit 71
com='stainless steel reflector , matrix plate and water reflector'
array 1 0 0 0
replicate 3 1 8.40 0.29037 9.90 9.90 0 0 1
replicate 8 1 0 0 0 0 0 2.2 1
replicate 3 1 30.0 30.0 30.0 30.0 30.0 30.0 1
hole 39 -4.49037 19.50 -2.2
end geom
read array
ara=1 nux=28 nuy=26 nuz=8
com='UCRI3D critical configuration with stainless steel reflector - case 2'
fill
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 11 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 11 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2
3r2 11 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3r2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2 2 2 2 11 2 2 2 11 2 2 2 2 2
3r2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2

```

[illegible][illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

```
3r9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9
3r9  31   9   9   9  31   9   9   9  31   9   9   9   9  30   9   9   9  30   9   9   9  30   9   9   9
3r9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9
3r9   9   9  31   9   9   9  31   9   9   9   9   9   9   9  30   9   9   9  30   9   9   9   9   9   9
3r9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9
3r9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9   9
end    fill
end    array
end    data
end
```

Referências Bibliográficas

- [1] G. F. Wienciek; A. B. Vandegrift; A.A. Levya; and A.S. Hebden. *Status and Progress of Foil and Target Fabrication Activities for the Production of ^{99}Mo from LEU*, RERTR 2008 - 30th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test, Washington, October 5-9, 2008.
- [2] I.N. Goldman, N. Ramamoorthy, and P. Adelfang, *Progress and status of the IAEA coordinated research project: production of Mo-99 using LEU fission or neutronic activation*, RERTR 2007, September 23-27, 2007, Prague, Czech Republic.
- [3] J. Fabro, M. Restelli, D. Podestá, G. Rossi; N. Boero *Development of LEU Targets for Mo-99 Production* Potential Mo-99 Producers Workshop. May 17-19, 2005. Buenos Aires, Argentina.
- [4] R. F. Barry, *LEOPARD - a spectrum dependent non-spatial depletion code* WCAP-3269-26, Westinghouse Electric Corporation, September 1963.
- [5] W. Kerr; J.S. King; J.C. Lee, W.R. Martin and D.K. Wehe, *The Ford nuclear reactor demonstration project for the evaluation and analysis of low enrichment fuel-final report* Argonne National Laboratory, Argonne, ANL/RERTR/TM-17, July 1991.
- [6] J. Barhein; W. Rhotenstein and E. Taviv, *The HAMMER Code System Technician*, Israel Institut of Technology, Haifa, Israel, NP-565, 1978.

-
- [7] W.W. Little, Jr. and R.W. Hardie, *2DB user's manual - revision I* BNWL-831, REVI, Batelle Pacific Northwest Laboratory, 1969.
- [8] T.B. Fowler, D.R. Vondy, G.W. Cunningham, - *Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION*, Oak Ridge National Laboratory, ORNL-TM-2496, Rev.2, Suppl. 3, July 1972.
- [9] *SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*, ORNL/TM-2005/39, Version 5.1, Vols. I-III, November 2006. Available from Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-732.
- [10] Umbehaun, P. E. *Metodologia para Análise Termo-hidráulica de Reatores de Pesquisa Tipo Piscina com Combustível Tipo Placa*. 2000. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- [11] Maeda, R. M. *Determinação Experimental de Parâmetros de Física de Reatores Utilizando Refletor de Água Pesada no Reator IPEN/MB-01*. 2012. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- [12] A. Mushtaq, Massod Iqbal, Ishtiaq Hussain Bokhari and Tayyab Mahmood, *Low enriched uranium foil plate target for the production of fission Molybdenum-99 in Pakistan Research Reactor-I*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 267(2009) 1109-1114.
- [13] International Atomic Energy Agency. *Homogenization Methods in Reactor Physics*. Viena: Nov. 1978. (IAEA TECDOC-231).
- [14] International Atomic Energy Agency (IAEA) Safety Standards. *Safety of Research Reactors*. Viena: 2005. (IAEA - Safety Requirements N°. NS-R-4).

- [15] Bsebsu, F. M and Abotweirat F., *Thermal Hydraulic Analysis of LEU Target for ^{99}Mo Production in Tajoura Reactor*, RERTR 2007, September 23-27, 2007, Prague, Czech Republic.
- [16] White M. F., *Fluid mechanics*, International Edition, McGraw-Hill, 1986.
- [17] Stern F., Wilson R., Coleman H., Paterson E., *Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations-Part 1: Methodology and Procedures*, TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF FLUIDS ENGINEERING, 2001, vol. 123, p. 793.
- [18] Launder B., Spalding D., *Lectures in mathematical models of turbulence*, 1972.
- [19] Launder B., Spalding D., *The numerical computation of turbulent flows, Computer methods in applied mechanics and engineering*, 1974, vol. 3, p. 269.
- [20] Torres, W. M., *Medida de Vazão no Núcleo do Reator IEA-R1 com o Elemento Dummy Instrumentado DMPV-01*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Jun. 2007. (Relatório Interno PSE.CENT.IEA-R1.093.00 - RELT.001.00).
- [21] Mura, L. F. L. *Medidas de Taxas de Reação Nuclear e de Índices Espectrais ao Longo do Raio das Pastilhas Combustíveis do Reator IPEN/MB-01*. 2010. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- [22] Gonçalves, L. B. *Calibração dos canais nucleares do Reator IPEN/MB-01, obtida a partir da Medida da Distribuição Espacial do Fluxo de Nêutrons Térmicos no Núcleo do Reator Através da Irradiação de Folhas de Ouro Infinitamente Diluídas*. 2008. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

- [23] Domingos, D. B. *Cálculos Neutronicos, Termo-hidráulicos e de Segurança de um Dispositivo para Irradiação de Miniplacas (DIM) de Elementos Combustíveis Tipo Dispersão*. 2010. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- [24] ANSYS CFX Disponível em: <<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid>>
Acesso em: 22 set. 2014.
- [25] Oliveira, A. F. S. *Estudo de Circulação Natural para o Projeto de Reator de Pesquisa Utilizando as Técnicas de Fluidodinâmica Computacional e Computação Evolucionária*. 2012. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro.
- [26] Nuclear Energy Agency (NEA). *Assessment of Computational Fluid Dynamics (CFD) for Nuclear Reactor Safety Problems*. Paris: 2008. (Nuclear Safety NEA/CSNI/R(2007)13).
- [27] Antunes, A. *Um Estudo da física de Sistemas Multiplicativos Subcríticos Acionados por Fontes e a Utilização de Códigos Determinísticos no Cálculo destes Sistemas*. 2008. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- [28] A. dos Santos, A. Abe, A. G. Mendonça, G. S. Almeida, L. C. C. B. Fanaro, *Criticality Analyses Based on the Coupled NJOY/AMPX-II/TORT*. ANS International Topical Meeting on Advances in Reactor Physics and Mathematics and Computation into the Next Millennium, Pittsburgh, USA, (2000).
- [29] Santos, A. *AMPX e BRDROL Interfaces NJOY para AMPX-II*, Relatório Interno IPEN/COESP, 1988.
- [30] Greene, N. M.; et al; *AMPX-II A Modular Code System for Generation Coupled Multigroup Neutron-Gamma Libraries from ENDF/B*, ORNL-TM-3706, 1976.

[31] Muniz, R. O. R. *Desenvolvimento de um Simulador Antropomórfico para Simulação e Medidas de Dose e Fluxo de Nêutrons na Instalação para Estudos em BNCT*. 2010. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

[32] Santos J. C., Marcondes G. H. *Análise Dimensional Interna de Placas Combustíveis*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Ago. 2013. (Relatório Interno - Centro do Combustível Nuclear - CCN).