AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ANÁLISE NEUTRÔNICA E ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA O COMBUSTÍVEL A
DISPERSÃO $\text{UO}_2\text{-Al}$ COM ADIÇÃO DE VENENO QUEIMÁVEL**

Rafael Oliveira Rondon Muniz

**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

2015

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

**ANÁLISE NEUTRÔNICA E ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA O COMBUSTÍVEL A
DISPERSÃO UMo-AI COM ADIÇÃO DE VENENO QUEIMÁVEL**

Rafael Oliveira Rondon Muniz

**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
2015

Em memória de minha avó Palmira Gomes Muniz

Agradecimentos

Aos meus pais Wanderley Gomes Muniz e Cecília Rogato Rondon pelo incentivo sem o qual não conseguiria realizar este trabalho;

À minha noiva Aurélia Miranda dos Santos pelo apoio e incentivo;

À minha irmã Rafaela Rogato Rondon Silva pelo apoio;

À minha avó Palmira Gomes Muniz;

Ao meu orientador Dr. Antonio Teixeira e Silva pela ajuda e atenção para a realização deste trabalho;

Ao meu coorientador Dr. Adimir dos Santos por toda dedicação e orientação em todas as etapas deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos;

Ao Dr. Douglas Borges Domingos por toda ajuda e apoio nas simulações, revisão do trabalho e utilização do LATEX;

Ao Dr. Pedro Carlos Russo Rossi por toda ajuda nas simulações com os programas SERPENT e MCNP-5;

Ao Dr. Luís Liambos Mura pela ajuda na análise dos resultados da irradiação das miniplacas e revisão do trabalho;

Ao Msc. Mitsuo Yamaguchi pela ajuda com o programa CITATION;

À Dra. Leda Cristina Cabelo Bernardes Fanaro pela ajuda com os dados do programa CITATION;

Ao Hugo Rodrigues Landim pelo projeto do irradiador e ajuda na irradiação das miniplacas;

Ao Rogério Jerez pela ajuda na irradiação das miniplacas;

Ao Msc. Rinaldo Fuga pelas operações do reator IPEN/MB-01 para irradiação das miniplacas;

A todos os funcionários do reator IPEN/MB-01 que direta ou indiretamente ajudaram na irradiação das miniplacas;

Ao Dr. Michelangelo Durazzo pela ajuda na especificação técnica e fabricação das miniplacas;

A todos os funcionários do Centro do Combustível Nuclear do IPEN/CNEN-SP que direta ou indiretamente ajudaram na fabricação das miniplacas;

Aos colegas: Dr. Gabriel Ângelo, Dr. Felipe Massicano, Msc. Gregório Soares de Souza e Thiago Garcia João;

À CAPES pelo apoio financeiro.

ANÁLISE NEUTRÔNICA E ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA O COMBUSTÍVEL A DISPERSÃO UMo-Al COM ADIÇÃO DE VENENO QUEIMÁVEL

Rafael Oliveira Rondon Muniz

Resumo

Este trabalho apresenta a análise neutrônica do combustível a dispersão de UMo-Al em relação ao aumento da densidade de urânio e faz uma comparação com o combustível de U_3Si_2 -Al. Neste estudo, a densidade de urânio do U_3Si_2 -Al é variada de 3,0 à 5,5 gU/cm³ e a do UMo-Al entre 4,0 à 7,5 gU/cm³ e com a porcentagem em massa de molibdênio com 7 e 10 %. Neste trabalho também é proposta a aplicação de veneno queimável metálico no cerne do combustível de UMo-Al, uma vez que este combustível é metálico e é analisada a utilização de gadolínio (Gd) e európio (Eu) como veneno queimável. A utilização do Gd como veneno queimável foi analisada com o fator de multiplicação infinito (k_∞) através do programa celular HRC desenvolvido pelo IPEN e composto pelos códigos HAMMER-TECHNION para a análise de célula, ROLAIDS para o cálculo de auto blindagem dos actínídeos e CINDER-2 empregado para a fissão e transmutação dos actínídeos. O núcleo do reator simulado foi similar ao do RMB (Reator Multipropósito Brasileiro) composto por um arranjo de 5x5 posições com 23 elementos combustíveis e dois blocos de alumínio. Para o európio, foram utilizados os programas SERPENT e CITATION. Os cálculos de queima foram realizados considerando uma potência de 30 MW durante três ciclos do RMB de 97 dias. Os resultados obtidos mostram que a porcentagem em massa do molibdênio têm uma grande influência no comportamento neutrônico devido a seção de choque de absorção do molibdênio ser considerável. Portanto, foi escolhida a porcentagem de 7 % de Mo para os estudos com veneno queimável. Para o núcleo proposto, o európio mostrou-se melhor, pois apresenta uma queima mais gradual que o gadolínio. Foi realizada uma simulação com o programa SERPENT com adição de 6 % de silício, o que mostrou que a adição de Si não causa mudança significativa no ciclo de operação do reator. Para validação da metodologia de cálculo, foi elaborada uma especificação técnica e fabricadas 12 miniplacas combustíveis de UMo-Al sem veneno queimável. As miniplacas foram irradiadas no núcleo do reator IPEN/MB-01, em quatro configurações de núcleo, para obtenção da reatividade inserida.

Os resultados simulados obtidos para a inserção de reatividade pelas miniplacas nos diversos núcleos analisados apresentaram alta concordância com os resultados experimentais.

NEUTRONIC ANALYSIS AND TECHNICAL SPECIFICATION FOR A UMo-Al DISPERSION FUEL WITH BURNABLE POISON ADDITION

Rafael Oliveira Rondon Muniz

Abstract

This work presents the neutronic analysis of the UMo-Al dispersion fuel concerning uranium density increase and shows comparisons relatively to the U_3Si_2 -Al fuel. The U_3Si_2 -Al uranium density varied from 3.0 to 5.5 gU/cm³ while that of UMo-Al fuel varied from 4.0 to 7.5 gU/cm³. The molybdenum mass content in the former case varies from 7 to 10 % in mass. Here, it is also proposed the utilization of burnable poison nuclides in the UMo-Al fuel meat. Since the fuel is metallic, gadolinium and europium were chosen as candidates to cope with this task. A recently developed cell code at IPEN (HRC) composed of the coupling of the codes HAMMER-TECHNION for the cell analysis, ROLAIDS for the actinide self-shielding calculations and CINDER-2 for the actinide and fission transmutation was employed for the neutronic analyses of UMo-Al. The simulated reactor core was similar to the one of RMB (Brazilian Multipurpose Reactor) composed of an array of 5x5 positions with 23 fuel elements and 2 aluminum blocks. A second analysis of the europium case employed the SERPENTE and CITATION codes. The burnup calculations were performed considering a power of 30 MW during three cycles of RMB 97 days. The analyses revealed that the molybdenum content has a great impact in the core reactivity due to its high absorption cross section. A value of 7 % was found adequate for the molybdenum mass content. The analyses also reveal that europium is a better burnable poison than gadolinium for the core cycle length and power level under consideration. It was realized a simulation with the computer code SERPENT with addition of 6 % silicon in UMo-Al fuel. The silicon does not change significantly the reactor operation cycle. To validate the calculation methodology it was developed a technical specification and fabricated 12 UMo-Al fuel miniplates without burnable poison. The miniplates were irradiated in the IPEN-MB/01 reactor core for four core configurations, in order to obtain the inserted reactivity. The simulated results for the reactivity insertion by the fuel miniplates in the analyzed cores showed high agreement with the experimental results.

Lista de Figuras

2.1	Densidade de urânio em função da fração volumétrica.	18
2.2	Seção de choque de absorção de nêutrons do molibdênio e do silício.	21
2.3	Seções de choque total e (n, gama) para ^{152}Gd	26
2.4	Seções de choque total e (n, gama) para ^{153}Gd	26
2.5	Seções de choque total e (n, gama) para ^{154}Gd	27
2.6	Seções de choque total e (n, gama) para ^{155}Gd	27
2.7	Seções de choque total e (n, gama) para ^{156}Gd	28
2.8	Seções de choque total e (n, gama) para ^{157}Gd	28
2.9	Seções de choque total e (n, gama) para ^{158}Gd	29
2.10	Seções de choque total e (n, gama) para ^{160}Gd	29
2.11	Seções de choque total e (n, gama) para ^{151}Eu	31
2.12	Seções de choque total e (n, gama) para ^{152}Eu	31
2.13	Seções de choque total e (n, gama) para ^{153}Eu	32
2.14	Seções de choque total e (n, gama) para ^{154}Eu	32
2.15	Seções de choque total e (n, gama) para ^{155}Eu	33
2.16	Seções de choque total e (n, gama) para ^{156}Eu	33
2.17	Seções de choque total e (n, gama) para ^{157}Eu	34
3.1	Núcleo do reator (vista superior).	35
3.2	Elemento Combustível (plano XY), visão da parte superior do elemento combustível.	36
3.3	Elemento combustível composto por quatro regiões ao longo do eixo axial - z.	37
3.4	Dimensões das miniplacas combustíveis.	40

3.5	Doze miniplacas combustíveis fabricadas.	41
3.6	Projeto do irradiador de acrílico.	43
3.7	Irradiador de acrílico para as miniplacas combustíveis.	44
3.8	Núcleo padrão (28 x 26) sem 16 varetas central.	45
3.9	Núcleo do reator com o irradiador de acrílico (visão radial).	46
3.10	Núcleo do reator com o irradiador de acrílico (visão axial).	47
3.11	Núcleo do reator com o irradiador de acrílico e miniplacas combustíveis. . .	48
3.12	Núcleo do reator modificado com o irradiador de acrílico e miniplacas combustíveis.	49
4.1	Comparação entre o U_3Si_2 -Al e UMo-Al com a variação da densidade de urânio.	50
4.2	Fator η da fórmula dos quatro fatores.	52
4.3	Fator ε da fórmula dos quatro fatores.	52
4.4	Fator p da fórmula dos quatro fatores.	53
4.5	Fator f da fórmula dos quatro fatores.	53
4.6	Comparação entre a queima do combustível U_3Si_2 -Al e do U7wt%Mo-Al. .	54
4.7	Comparação entre a queima do combustível U_3Si_2 -Al e do U10wt%Mo-Al. .	55
4.8	Comparação entre a conversão do ^{239}Pu no combustível U_3Si_2 -Al e no U7wt%Mo-Al.	56
4.9	Simulações com o programa HRC com a variação Gd entre 0 (sem Gd) a 0,10 % em massa.	57
4.10	Simulações com o CITATION com a variação de Eu entre 0 a 0,30% em massa.	58
4.11	Valores de k para U7wt%Mo-Al com 3,55 gU/cm ³ e 0,25% de Eu.	60
4.12	Reatividade para U7wt%Mo-Al com 3,55 gU/cm ³ e 0,25% de Eu.	62
4.13	Concentração total em átomo/b.cm para o ^{235}U ao longo da queima.	63
4.14	Concentração total em átomo/b.cm para o ^{238}U e ^{239}Pu ao longo da queima. .	64
4.15	Concentração total em átomo/b.cm para o ^{151}Eu e ^{152}Eu ao longo da queima. .	64
4.16	Concentração total em átomo/b.cm para o ^{153}Eu e ^{154}Eu ao longo da queima. .	65
4.17	Concentração total em átomo/b.cm para o ^{155}Eu e ^{156}Eu ao longo da queima. .	66
4.18	Comparação do ciclo sem veneno queimável e com európio.	66

4.19	Comparação da queima com e sem adição de silício	69
4.20	Detalhe de duas regiões de medida do reatímetro.	71
4.21	Reatímetro ao longo de toda medida - terceira configuração.	72
A.1	Projeto do conjunto inteiro do irradiador de acrílico.	78
A.2	Detalhe do suporte das miniplacas, parte superior do irradiador.	79
A.3	Detalhe do suporte do irradiador, parte inferior do irradiador.	80

Lista de Tabelas

2.1	Elementos possíveis para veneno queimável.	24
2.2	Porcentagem isotópica natural do gadolínio.	25
2.3	Porcentagem isotópica natural európio.	30
3.1	Granulometria das partículas de UMo.	39
3.2	Dimensões da minipla combustível U7wt%Mo-Al.	40
3.3	Massas das miniplacas combustíveis	42
4.1	Valores de k para U7wt%Mo-Al com 3,55 gU/cm ³ e 0,25% de Eu.	59
4.2	Reatividade para U7wt%Mo-Al com 3,55 gU/cm ³ e 0,25% de Eu.	61
4.3	Variação da reatividade com o aumento da temperatura.	67
4.4	Comparação entre a queima com e sem silício.	68
4.5	Simulações das operações de irradiação das miniplacas.	70
4.6	Simulação da reatividade inserida pelo irradiador e miniplacas.	70
4.7	Segunda operação criticalidade inserida pelo irradiador.	71
4.8	Retirada da Barra BC#1	73
4.9	Retirada da Barra BC#2	73
4.10	Quarta configuração núcleo modificado.	74
4.11	Resultados das simulações e experimentos.	74

Sumário

1. Introdução	14
1.0.1 Objetivo	15
1.0.2 Aspectos Relevantes e Originalidade	15
1.0.3 Organização do Conteúdo	16
2. Revisão Bibliográfica	17
2.1 Restrição ao Alto Enriquecimento de Urânio	17
2.2 A liga Urânio - Molibdênio	20
2.3 Descrição dos Reatores de Pesquisa Similares ao RMB	22
2.4 Veneno Queimável	23
2.4.1 Gadolínio	25
2.4.2 Európio	30
3. Metodologia para Análise Neutrônica do Combustível UMo-Al com Adição de Ve- nenos Queimáveis	35
3.1 Descrição Do Reator Para Estudo	35
3.2 Códigos Computacionais	37
3.3 Parâmetros Para a Fabricação das Miniplacas	38
3.3.1 Conteúdo de Urânio e Molibdênio	38
3.3.2 Concentração Isotópica	38
3.3.3 Diâmetro da Partícula Combustível	38
3.3.4 Massa Específica	39
3.3.5 Dimensões da Miniplaca Combustível	39

3.3.6	Miniplacas Combustíveis Fabricadas	41
3.4	Irradiador de Acrílico	42
3.5	Irradiação das Miniplacas	44
4.	<i>Resultados e Análise</i>	50
4.0.1	Variação da Densidade de Urânio	50
4.0.2	Veneno Queimável	56
4.0.3	Gadolínio	56
4.0.4	Európio	57
4.0.5	Ciclo de Operação	62
4.0.6	Variação de Temperatura	67
4.0.7	Adição de Silício	67
4.0.8	Resultados Irradiação das Miniplacas	69
4.0.9	Comparação Entre os Resultados Simulados E Experimentais	74
5.	<i>Conclusões</i>	75
6.	<i>Trabalhos Futuros</i>	76
	<i>Apêndice</i>	77
A.	<i>Irradiador De Acrílico</i>	78
B.	<i>Dados De Entrada Do MCNP-5 Configuração 3</i>	83
C.	<i>Dados De Entrada Do MCNP-5 Configuração 4</i>	96
D.	<i>Dados De Entrada Do CITATION</i>	110
	<i>Referências</i>	118

Introdução

Com as restrições impostas ao comércio e utilização de combustíveis nucleares com urânio altamente enriquecido (maior que 20 % de ^{235}U) os estudos na área de combustíveis nucleares voltaram-se para materiais que permitissem uma maior densidade de urânio no combustível, para compensar o baixo enriquecimento. Esses novos materiais, com isso, permitiriam a conversão dos reatores de pesquisa que utilizam combustíveis com alto enriquecimento (HEU - “*High Enriched Uranium*”) para combustíveis de baixo enriquecimento (LEU - “*Low Enriched Uranium*”), sem alteração no projeto e finalidade destes reatores.

Em 1987, foram apresentados trabalhos que deram como qualificadas as dispersões $\text{UAl}_x\text{-Al}$, $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ e o $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ com densidades, respectivamente, de 2,3 gU/cm³ (45 % em volume), 3,2 gU/cm³ (45 % em volume) e 4,8 gU/cm³ (42,5 % em volume).

Destes combustíveis, o que permite maior densidade de urânio é o $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ (4,8 gU/cm³). Mesmo com este combustível, não foi possível converter para baixo enriquecimento os combustíveis dos reatores de pesquisa que possuem alta potência.

As pesquisas atualmente apontam que a liga mais promissora, que permite maior densidade de urânio, é a liga de urânio-molibdênio (UMo). Esta liga pode chegar a uma densidade de urânio de 8 gU/cm³ na fase dispersa e 16 gU/cm³ na forma monolítica.

O urânio-molibdênio é uma liga metálica que permite a adição de um elemento diretamente no combustível nuclear com a função de veneno queimável.

A possibilidade do combustível de UMo-Al se tornar um padrão para reatores de pesquisa, como o $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ é hoje, tem motivado os pesquisadores do IPEN/CNEN-SP a desenvolver pesquisas com este combustível.

No Brasil, está em desenvolvimento o Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), em fase

de projeto de detalhamento, que irá utilizar como combustível o U_3Si_2-Al e como veneno queimável fios de cádmio fixados no elemento combustível.

1.0.1 *Objetivo*

Esta tese tem como objetivo avaliar a aplicação do combustível UMo-Al em um núcleo análogo ao do RMB com a utilização de veneno queimável. Será analisado, através de simulações, o comportamento neutrônico do combustível UMo-Al com o aumento da densidade de urânio e com as porcentagens em massa de 7% e 10% de molibdênio e comparado com o comportamento neutrônico do combustível de U_3Si_2-Al . Os programas HAMMER, ROLAIDS e CINDER (HRC) serão aplicados nesta análise.

Com relação ao veneno queimável, é avaliada a utilização do gadolínio e do európio no ciclo de operação de um reator análogo ao RMB. A aplicação do gadolínio é analisada com o programa HRC e a do európio com o programa CITATION.

Também, será elaborada uma especificação técnica de fabricação para miniplacas combustíveis de UMo-Al, sem veneno queimável, com a densidade de 4 gU/cm^3 . As miniplacas fabricadas a partir dessa especificação serão irradiadas no núcleo do reator IPEN/MB-01 e permitirão verificar a inserção de reatividade inserida no núcleo do reator e a sua comparação com simulações computacionais efetuadas para as mesmas configurações utilizadas no núcleo.

1.0.2 *Aspectos Relevantes e Originalidade*

A metodologia utilizada neste trabalho mostra que, do ponto de vista neutrônico, será possível utilizar veneno queimável aplicado diretamente no cerne do combustível de UMo-Al para o RMB. A utilização de veneno queimável distribuído homogeneamente no interior do combustível poderá facilitar a fabricação do elemento combustível do RMB.

A irradiação de miniplacas combustíveis do tipo UMo-Al nunca foi realizada no Brasil. A qualificação da metodologia de cálculo para o combustível UMo-Al com adição de veneno queimável dará aval para a fabricação futura de miniplacas com veneno queimável para testes e utilização em reatores de pesquisa.

1.0.3 Organização do Conteúdo

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica relativa ao desenvolvimento de combustíveis nucleares devido as restrições ao alto enriquecimento de urânio e uma breve descrição da liga de urânio-molibdênio, de reatores de pesquisa similares à proposta do RMB, dos venenos queimáveis que podem ser adicionados à liga e as seções de choque total e de captura radiativa do gadolínio e európio. O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada com a descrição do reator simulado, os códigos computacionais utilizados, os parâmetros mais importantes para a fabricação das miniplacas utilizadas para irradiação no reator IPEN-MB/01 e o projeto do irradiador. Também, neste capítulo, são apresentadas as configurações utilizadas no núcleo do reator IPEN/MB-01 para a irradiação das miniplacas. No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos das simulações e das irradiações das miniplacas. O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho. O capítulo 6 apresenta sugestões de trabalhos futuros baseados nos resultados encontrados nesta tese.

Revisão Bibliográfica

2.1 Restrição ao Alto Enriquecimento de Urânio

Em meados dos anos cinquenta, com as restrições impostas ao comércio e utilização de combustíveis com urânio altamente enriquecido, a “*Atomic Energy Commission*” dos Estados Unidos requisitou ao “*Oak Ridge National Laboratory*” (ORNL) a construção de um reator tipo piscina utilizando elementos combustíveis tipo placa com baixo enriquecimento em ^{235}U (menor que 20% em peso de ^{235}U - “*Low Enriched Uranium* - LEU”). Este reator deveria ser apresentado na Conferência de Genebra em agosto de 1955. Devido ao pouco tempo disponível, tornou-se impossível realizar grandes modificações no projeto do combustível, uma vez que a tecnologia existente estava voltada para a fabricação de combustíveis com alto enriquecimento. Sendo assim, o ORNL optou simplesmente por aumentar por um fator de 5 a quantidade de urânio em cada placa (conservando as demais variáveis de projeto). Desta forma, ele garantia que a reatividade do núcleo do reator não se alteraria devido à redução do enriquecimento.

As ligas de Urânio - Alumínio (UAL), que vinham sendo utilizadas em reatores de teste de materiais com 10 a 20% em peso de urânio, passaram a ter entre 45 e 50% em peso deste material. Entretanto, já nas etapas de fabricação, as placas combustíveis fabricadas com altas concentrações de urânio apresentaram problemas de fragilidade e de falta de homogeneidade da composição, tornando inviável a sua utilização /1/.

Para contornar este problema, os pesquisadores da época iniciaram a busca de materiais com maiores massas específicas de urânio, de forma a reduzir a concentração em peso (e ou volume) das placas fabricadas. Dentre os materiais pesquisados, o UAL_x , o U_3O_8 , o U_3Si_2 e o U_6Fe apresentaram-se como os mais promissores a possíveis utilizações. O U_3Si_2 era o

mais viável, devido a sua maior massa específica e o U_6Fe não se mostrou adequado.

Além de novos materiais, novas técnicas de fabricação tiveram que ser desenvolvidas, surgindo os combustíveis a dispersão, onde um composto de urânio é disperso homogeneamente em alumínio, fabricados pela técnica da metalurgia do pó, uma vez que era impossível combinar os novos materiais em uma liga. Através desta técnica de fabricação pode-se obter, além de uma distribuição homogênea da fase físsil, concentrações que não comprometessem as etapas de fabricação subsequentes. Entretanto, para garantir a integridade mecânica das placas, a concentração em volume da fase dispersa deveria ser limitada em 45% em volume [2].

A Figura 2.1 mostra a relação da densidade de urânio com a fração volumétrica, para os principais compostos de urânio usados como combustível. A linha tracejada na vertical mostra a fração volumétrica máxima para combustíveis a dispersão.

Figura 2.1: Densidade de urânio em função da fração volumétrica.

No final dos anos setenta, um grupo de trabalho selecionado pelo *International Atomic Energy Agency* (IAEA) dentro da estrutura do *International Nuclear Fuel Cycle Evaluation* (INFCE) começou a investigar a possibilidade de utilização da energia nuclear para fins pacíficos com a simultânea minimização do risco de proliferação de armas nucleares. A partir destas investigações, concluiu-se que o risco de proliferação de armas nucleares

poderia ser minimizado com a conversão dos núcleos de *Material Test Reactor* (MTR) de *High Enriched Uranium* (HEU - 93% em peso de ^{235}U) para *Low Enriched Uranium* (LEU - 20% em peso de ^{235}U). Sendo assim, países detentores da tecnologia nuclear (em particular, Estados Unidos, Canadá, Alemanha, França e Argentina) iniciaram programas de desenvolvimento de combustíveis com baixo enriquecimento em ^{235}U com o intuito de realizar posteriormente a conversão de seus reatores (Programa RERTR - *Reduced Enrichment Research and Test Reactor*) /3/.

Em 1987, no congresso intitulado “International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactor” realizado em Buenos Aires, Argentina, foram apresentados trabalhos que deram como qualificadas as dispersões $\text{UAl}_x\text{-Al}$, $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ e o $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ com densidades, respectivamente, de $2,3 \text{ gU/cm}^3$ (45% em volume), $3,2 \text{ gU/cm}^3$ (45% em volume) e $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (42,5% em volume), devido ao bom desempenho apresentado pelas mesmas nos testes realizados /4/.

O combustível usado no Reator IEA-R1, o reator de pesquisa de maior potência do país, é formado por placas combustíveis com núcleos de dispersão e revestidas com alumínio.

Até 1981, os elementos combustíveis do Reator IEA-R1 eram do tipo MTR consistindo de ligas de UAl enriquecidas a 93,15% em peso de ^{235}U e, atualmente, é composto por combustível do tipo LEU de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ com baixo enriquecimento e pode operar a uma potência de até 5MW /5/. Tal combustível é hoje produzido no Brasil com tecnologia totalmente nacional, resultado de um esforço conjunto do Centro de Engenharia Nuclear e do Centro do Combustível Nuclear ambos do IPEN/CNEN-SP em resposta à dificuldade de adquirir esse combustível no mercado internacional na primeira metade da década de 80 e à decisão de aumentar a potência e o regime de operação do reator IEA-R1 para fazer frente à necessidade de aumentar a produção de radioisótopos.

Um novo reator produtor de radioisótopos, o Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) com potência e fluxo neutrônico compatíveis com as necessidades brasileiras, já vem a algum tempo sendo discutido pela comunidade médica e científica e pela Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, sendo considerada prioritária e inadiável a sua conclusão. Para este projeto, um novo tipo de combustível que permita uma flexibilização no ciclo do combustível e no veneno queimável utilizado é de grande interesse.

Um combustível que possa permitir uma maior densidade de urânio é importante para

a vida útil do combustível. Quanto maior for a concentração de urânio no mesmo, maior será seu ciclo de queima, ou seja, sua vida útil operando no núcleo do reator, diminuindo o consumo de elementos combustíveis e resultando na geração de uma menor quantidade de combustível exaurido, ou queimado, além de simplificar o projeto como um todo, sob o ponto de vista de fabricação do combustível e de impacto ambiental.

As pesquisas mundiais apontam para a substituição da tecnologia do siliceto de urânio pela tecnologia da liga Urânio - Molibdênio (considerado o combustível do futuro), tanto pela dificuldade observada no reprocessamento do combustível queimado de siliceto de urânio, quanto pela alta concentração de urânio que pode ser atingida com o uso do combustível urânio-molibdênio.

2.2 A liga Urânio - Molibdênio

As ligas de urânio que se mostraram promissoras, em termos de comportamento sob irradiação, são as que podem ser mantidas na sua estrutura cristalina cúbica (fase γ). Ligas com tendência de formar esta fase gama são: UCr, UMo, UNb, URe, URu, UTi, UV, UZr, etc. Entre estas, a liga que apresenta uma ampla extensão de fase gama é a liga UMo. Além disso, o Mo tem uma seção de choque de absorção relativamente baixa /6/. A liga UMo é atualmente a liga estudada para ser o combustível dos reatores nucleares de pesquisa no futuro.

A liga de UMo é obtida pela fusão do urânio com o molibdênio, obtendo-se um lingote de U-Mo. As ligas de urânio-molibdênio geralmente estudadas utilizam uma porcentagem em peso de molibdênio de 7 % (U7wt%Mo) ou 10% (U10wt%Mo).

Das técnicas para se obter o pó de UMo, o Brasil possui a técnica de hidretação-dehidretação /7/.

Entre as vantagens de se utilizar esta liga como combustível nuclear destacam-se: permitir utilizar maior densidade de urânio em relação aos combustíveis atuais (U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al), possuir melhor eficiência no reprocessamento do combustível e poder ser fabricado tanto como combustível a dispersão (utilizando pó de UMo-Al) como no formato de uma lâmina de UMo (conhecido como Monolítico) /8/.

A variação da porcentagem do molibdênio (Mo) muda o comportamento neutrônico do combustível, uma vez que a absorção de nêutrons pelo Mo é considerável. A Figura 2.2

mostra a comparação entre a seção de choque de absorção do Mo e do silício (Si) /9/. O silício é a base do combustível nuclear (U_3Si_2-Al) mais utilizado para reatores de pesquisa.

Figura 2.2: Seção de choque de absorção de nêutrons do molibdênio e do silício.

Em meados dos anos oitenta, o programa RERTR iniciou o estudo das ligas de urânio-molibdênio. Este tipo de liga permite uma densidade de urânio em torno de $8gU/cm^3$ na fase dispersa. Porém, nos teste de irradiação com queimas acima de 65% do combustível, foi detectado o surgimento de uma camada de interação entre o urânio e o alumínio, devido a difusão do alumínio nas partículas de UMo , causando inchamento e perda da condutividade térmica no combustível /10/.

Os estudos atuais buscam solucionar o problema da difusão do alumínio no núcleo do combustível. Os resultados encontrados até o momento indicam como uma das soluções a adição de silício na matriz, estabilizando e reduzindo as propriedades de interação. Porém, ainda não se tem um limite claro para a porcentagem de Si na matriz. As pesquisas têm sido realizadas com adição de valores entre 3 a 7% de Si. O fenômeno que dificulta a obtenção e uma porcentagem mais precisa de Si é o aumento da camada de interação sobre irradiação, o que faz com que o Si se “dilua” na região e cause a perda de eficiência. Embora essa dificuldade possa ser contornada com o aumento de Si na matriz, este aumento dificulta o reprocessamento do combustível /11/.

Além da adição de Si, outro parâmetro importante para reduzir a camada de interação é o tamanho das partículas de UMo usadas na dispersão /12/.

Outra possibilidade de utilização do combustível UMo é a possibilidade de ser fabricado na forma monolítica (núcleo do combustível na forma metálica contínuo de UMo). A espessura desta placa está entre 0,254 a 0,381 mm, sendo possível obtenção de densidades em torno de 16 gU/cm³. O interesse no estudo deste tipo de material é para a conversão de reatores de pesquisa de alto desempenho como, por exemplo, o Reator de Testes Avançados (“*Advanced Test Reactor*” - ATR) do Laboratório Nacional de Idaho. Este reator pode operar a uma potência de 250 MW /13/.

O Brasil não dispõe de reatores de pesquisa que possibilitem testes de queima do combustível com miniplacas combustíveis de UMo-Al em intervalos razoáveis de tempo e nem células quentes que permitam testes destrutivos. O avanço na pesquisa com este tipo de combustível no país tem sido feito através de estudos bibliográficos e simulações computacionais.

2.3 Descrição dos Reatores de Pesquisa Similares ao RMB

Para o fornecimento de radioisótopos e pesquisas em geral, os reatores de teste de materiais são de vital importância. Em relação ao fornecimento de radioisótopos, o mundo enfrenta grandes dificuldades de produção e fornecimento, principalmente para o molibdênio para obtenção do Tecnécio-99 (⁹⁹Tc). Neste cenário, ao redor do mundo, têm-se projetos de reatores multipropósito (fornecimento de radioisótopos, teste de materiais, pesquisas neutrônicas etc...) em desenvolvimento.

Nesta linha de reatores, pode-se dar como exemplo dois reatores, um em operação e o outro em fase de construção, respectivamente, o reator *Open Pool Australian Lightwater* (OPAL) e o *Jules Horowitz Reactor* (JHR).

O reator OPAL entrou em operação em agosto de 2006. Ele tem uma potência de 20 Megawatt e utiliza combustível U₃Si₂-Al de baixo enriquecimento (LEU), como moderador a água leve (H₂O) e como refletor a água pesada (D₂O) e tem um ciclo de operação entre 30 e 35 dias. O reator Opal tem como objetivos a produção de radiofármacos, pesquisas científicas e industrial /14/.

Uma colaboração internacional está desenvolvendo o JHR que está sendo construído

em Cadarache na França. A potência térmica do JHR será de 100 MW com moderação e refrigeração a água. O futuro combustível do JHR será de UMo com densidade de urânio de 8 gU/cm^3 . O combustível urânio - molibdênio tanto à dispersão quanto monolítico ainda está em fase de desenvolvimento e não estará em produção antes do início da operação do JHR. A solução para o início das atividades do reator será utilizar o combustível $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ com alto enriquecimento (27% de ^{235}U) /15/.

No Brasil, está em fase de detalhamento o projeto do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) que tem a finalidade dos reatores citados anteriormente. O RMB usará como moderador a água leve (H_2O) e como refletor a água pesada (D_2O) e terá uma potência de 30 MW, um ciclo de operação aproximadamente de 30 dias e usará como combustível o $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$.

Nesses reatores, é necessário o uso de veneno queimável. O OPAL usa fios de cádmio junto ao elemento combustível e o RMB também usará este tipo de veneno queimável.

2.4 Veneno Queimável

Em física de reatores, materiais que são adicionados ao núcleo do reator e têm alta seção de choque de absorção de nêutrons e durante a reação de absorção geram produtos com baixa seção de choque de absorção de nêutrons são chamados de veneno queimável, uma vez que o elemento absorvedor de nêutrons desaparece na reação.

A aplicação de veneno queimável no núcleo do reator é de vital importância para reatores de potência para assegurar a reatividade inicial do núcleo necessária e, portanto, permitir um ciclo de operação adequado para a finalidade do reator. Exemplos de materiais utilizados como veneno queimável são:

- Óxido de gadolínio - Gd_2O_3 (usado na usina Angra 2);
- Compostos borados tais como: B_4C , ZrB_2 e ligas de Al-B /13/;
- Fios de cádmio junto ao elemento combustível (Reator OPAL e RMB).

Os materiais citados acima como venenos queimáveis estão posicionados fora do combustível nuclear e ficam em posições específicas no núcleo do reator e não estão distribuídos homogeneamente. A aplicação do veneno queimável diretamente no cerne do combustível

(“meat”) e distribuído homogeneamente é importante, pois trás uma segurança maior, uma vez que, não existe a possibilidade dele ser removido do núcleo, pois está contido dentro no próprio combustível. Em relação ao fio de cádmio, os venenos inseridos homogeneamente no cerne do combustível possibilitam a simplificação na construção do elemento combustível (EC), evitando a dificuldade de fixação dos fios de cádmio no EC.

A liga metálica UMo possibilita o estudo da adição de um elemento metálico, com as propriedades de veneno queimável, que seja aplicado diretamente na liga. Como o veneno estará no cerne do combustível, a reação desejada para a absorção é a captura radiativa (n, γ), para não adicionar danos ao combustível devida a emissão de partículas carregadas, como por exemplo em reações (n, α). A Tabela 2.1 apresenta os principais elementos com esta característica para utilização como veneno.

Tabela 2.1 - Elementos possíveis para veneno queimável.

Elemento	Seção de Choque de Absorção (σ_a (b))
Disprósio	930
Érbio	162
Európio	4600
Gadolínio	49000
Háfnio	102

O veneno queimável a ser utilizado deve ser ponderado com o fluxo de nêutrons que o reator apresenta, pois se o fluxo de nêutrons for alto e o elemento utilizado também tiver uma seção de choque alta, o veneno será consumido rapidamente. No caso de uma seção de choque baixa e fluxo baixo, o veneno não atuara da forma adequada no controle da reatividade.

O cádmio também possui seção de choque de absorção alta (2450 b) e será o veneno queimável utilizado no RMB. Portanto, será avaliada a utilização de outros materiais como veneno queimável.

A Tabela 2.1 mostra que os elementos com seção de choque mais altas são o gadolínio (Gd) e o európio (Eu). Devido a este fato, os dois elementos serão analisados como possíveis candidatos a venenos queimáveis aplicados ao combustível para o reator proposto.

2.4.1 Gadolínio

A Tabela 2.2 apresenta a porcentagem isotópica natural do gadolínio com as respectivas seções de choque para a captura radiativa.

Tabela 2.2 - Porcentagem isotópica natural do gadolínio.

Isótopo	Porcentagem (%)	$\sigma_{(n,\gamma)}$ para 0,0253 eV (b)
152	0,20	1056
154	2,18	85
155	14,80	60889
156	20,47	2,188
157	15,65	254078
158	24,84	2,4966
160	21,86	796.10^{-3}

Como a reação nuclear é a captura radiativa, ocorre uma “cadeia de absorção” na qual, o ^{152}Gd absorve um nêutron e emite uma gama e se transforma em ^{153}Gd que por sua vez absorve um nêutron e se transforma em ^{154}Gd e, assim, sucessivamente: $^{152}\text{Gd} \rightarrow ^{153}\text{Gd} \rightarrow ^{154}\text{Gd} \rightarrow ^{155}\text{Gd} \rightarrow ^{156}\text{Gd} \rightarrow ^{157}\text{Gd} \rightarrow ^{158}\text{Gd} \rightarrow ^{159}\text{Gd}$. O ^{159}Gd decai por emissão beta com uma meia vida de 18,479 horas e o $^{160}\text{Gd} \rightarrow ^{161}\text{Gd}$. O ^{161}Gd decai por emissão beta com uma meia vida de 3,646 minutos.

As Figuras de 2.3 a 2.10 mostram a comparação entre a seção de choque total e a seção de choque de captura radiativa (n,γ) dos isótopos naturais do gadolínio.

Figura 2.3: Seções de choque total e (n, gama) para ^{152}Gd .

Figura 2.4: Seções de choque total e (n, gama) para ^{153}Gd .

Figura 2.5: Seções de choque total e (n, gama) para ^{154}Gd .

Figura 2.6: Seções de choque total e (n, gama) para ^{155}Gd .

Figura 2.7: Seções de choque total e (n, gama) para ^{156}Gd .

Figura 2.8: Seções de choque total e (n, gama) para ^{157}Gd .

Figura 2.9: Seções de choque total e (n, gama) para ^{158}Gd .

Figura 2.10: Seções de choque total e (n, gama) para ^{160}Gd .

Através das Figuras, nota-se que grande parte das seções de choque dos isótopos naturais do gadolínio na região térmica e epitérmica é devido à captura radiativa.

2.4.2 Európio

O európio possui uma seção de choque de captura radiativa aproximadamente 10 vezes (Tabela 2.1) menor que o gadolínio e tem dois isótopos naturais como mostra a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Porcentagem isotópica natural európio.

Isótopo	Porcentagem (%)	$\sigma_{(n,\gamma)}$ para 0,0253 eV (b)
151	47,8	9198
152		12774
153	52,2	312.7
154		1842
155		3758
156		100

Assim como no caso do gadolínio, também ocorre uma cadeia de captura radiativa: $^{151}\text{Eu} \rightarrow ^{152}\text{Eu} \rightarrow ^{153}\text{Eu} \rightarrow ^{154}\text{Eu} \rightarrow ^{155}\text{Eu} \rightarrow ^{156}\text{Eu} \rightarrow ^{157}\text{Eu}$. Porém, no caso do európio, apenas os isótopos ^{151}Eu e ^{153}Eu são naturais. Do ^{153}Eu em diante, para o surgimento do isótopo seguinte, é necessária a reação de captura pelo isótopo anterior. As Figuras de 2.11 a 2.17 mostram a comparação entre as seções de choque total e de captura radiativa. Pode-se notar pelas figuras que nas regiões das energias térmica e epitérmica praticamente só ocorre a reação de captura radiativa.

Figura 2.11: Seções de choque total e (n, gama) para ^{151}Eu .

Figura 2.12: Seções de choque total e (n, gama) para ^{152}Eu .

Figura 2.13: Seções de choque total e (n, gama) para ^{153}Eu .

Figura 2.14: Seções de choque total e (n, gama) para ^{154}Eu .

Figura 2.15: Seções de choque total e (n, gama) para ^{155}Eu .

Figura 2.16: Seções de choque total e (n, gama) para ^{156}Eu .

Figura 2.17: Seções de choque total e (n, gama) para ^{157}Eu .

Uma diferença importante entre as seções de choque do gadolínio e do európio é que, para o gadolínio, os isótopos 158 e 160 possuem valores de seção de choque de captura radiativa reduzida (final da cadeia de absorção). Já os isótopos 154, 155 e 156 (seguintes ao ^{153}Eu) tem seção de choque elevada.

Metodologia para Análise Neutrônica do Combustível UMo-Al com Adição de Veneno Queimável

3.1 Descrição Do Reator Para Estudo

Baseado nos reatores descritos anteriormente, foi simulado um núcleo com 23 elementos combustíveis, em um arranjo com 5 por 5 posições (5x5) e dois blocos de alumínio (posições de irradiação) envolto por 50 cm de água pesada (D₂O) e 40 cm de água leve, como mostra a Figura 3.1.

Figura 3.1: Núcleo do reator (vista superior).

O elemento combustível é constituído por 21 placas combustíveis revestidas de alumínio

e sua estrutura é um suporte lateral de alumínio onde as placas combustíveis são encaixadas. Cada placa possui um cerne do combustível com 6,5 cm de largura, 61,5 cm de comprimento e 0,061 cm de espessura. As placas combustíveis exteriores que “fecham” (bordas) o elemento tem uma espessura de 0,150 cm. O espaço entre as placas formam o canal de refrigeração com uma espessura de 0,245 cm. Na simulação, a região do canal de refrigeração é preenchida com água assim como em volta do elemento combustível, que tem uma camada de 0,05 cm de água. A Figura 3.2 mostra o elemento combustível com as 21 placas.

Figura 3.2: Elemento Combustível (plano XY), visão da parte superior do elemento combustível.

Nas simulações, os elementos combustíveis foram modelados como compostos por quatro regiões ao longo do comprimento (eixo axial - z), como mostra a Figura 3.3. Estas divisões são necessárias para levar em consideração a variação do fluxo de nêutrons ao longo do eixo axial (“buckling”) em cada passo de queima.

A potência utilizada nas simulações foi de 30 MW e o ciclo de operação que o reator tem que atingir é de 30 dias.

Nas simulações, não foram modeladas as partes estruturais do núcleo, como por exemplo, os canais de irradiação devido ao objetivo ser uma análise do combustível do núcleo.

Figura 3.3: Elemento combustível composto por quatro regiões ao longo do eixo axial - z.

3.2 Códigos Computacionais

Neste trabalho, os dados nucleares para o combustível foram gerados pelo programa HRC, que consiste do acoplamento dos programas HAMMER /16/, ROLAIDS /17/ e CINDER /18/. O HAMMER utiliza a equação de transporte para gerar a seção de choque de uma célula unitária homogênea. O ROLAIDS faz o tratamento da autoblindagem na forma pontual e o CINDER é o módulo responsável pela queima /19/.

A simulação tridimensional do núcleo proposto foi realizada utilizando o código computacional CITATION /20/ que utiliza o método das diferenças finitas e aplica a teoria da difusão para resolver problemas de difusão de nêutrons. Os dados nucleares para o elemento combustível em cada etapa de queima foram fornecidos pelo programa HRC, ou seja, o elemento combustível considerado é uma região homogeneizada, exceto o suporte lateral que é colocada explicitamente. Os dados nucleares para os componentes, tais como o suporte lateral do elemento combustível, água leve, água pesada, bloco de alumínio etc... foram obtidos através do sistema modular AMPX-II /17/.

Outro código utilizado para a simulação foi o SERPENT /21/, que foi desenvolvido pelo VTT Centro de Pesquisa Tecnológico da Finlândia em 2004. Ele utiliza o método de Monte

Carlo de energia continua e realiza o cálculo de queima do combustível ao longo do ciclo. No SERPENT, toda a simulação do reator é realizada de forma explícita, diferentemente do HRC - CITATION (região do combustível homogenizada), porém o tempo necessário de cálculo é muito maior do que o HRC - CITATION necessita. Por essa razão, a simulação com o SERPENT será utilizada apenas no combustível selecionado.

Para as simulações das miniplacas combustíveis no núcleo do reator IPEN/MB-01 foi utilizado o código “*Monte Carlo N- Particle Transporte Code*” (MCNP) versão MCNP-5 /22/. Este código foi utilizado pois os dados de entrada para as simulações foram os utilizados pela física de reatores do Centro de Engenharia Nuclear (CEN) modelado em MCNP. O MCNP, assim como o SERPENT, utilizam método Monte Carlo, que é um método estatístico utilizado para obter aproximações numéricas de sistemas complexos.

3.3 Parâmetros Para a Fabricação das Miniplacas

Os parâmetros mais importantes para a fabricação do combustível de UMo-Al estão apresentados a seguir.

3.3.1 Conteúdo de Urânio e Molibdênio

A proporção a ser utilizado é de 93% em massa de urânio e 7% em massa de molibdênio (U7wt%Mo).

A densidade de urânio em cada placa será de 4 gU/cm³.

O lingote de urânio-molibdênio será produzido pela fusão do urânio e do molibdênio.

O pó de urânio-molibdênio é obtido através do processo de Hidretação - Dehidretação, realizado pelo Centro do Combustível Nuclear do IPEN/CNEN-SP.

3.3.2 Concentração Isotópica

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

3.3.3 Diâmetro da Partícula Combustível

O diâmetro da partícula combustível é um parâmetro importante que está relacionado com a acomodação dos produtos de fissão no cerne do combustível.

A distância média entre as partículas varia de acordo com a fração em volume de combustível existente na placa. Dada a impossibilidade de se obter um único diâmetro de partícula, especifica-se normalmente uma faixa granulométrica na qual as partículas combustíveis devam estar inseridas.

É comum a utilização de partículas combustíveis na faixa de 44 a 150 μm (75 a 85% em peso) com apenas uma quantidade limitada (15 a 25% em peso) de pó mais fino (menor que 44 μm).

A partícula de UMo apresenta um comportamento dúctil, ou seja, uma resistência a se fragmentar nas etapas de laminação. Devido a este comportamento a granulometria usualmente utilizada pelos demais combustíveis não apresenta resultados satisfatórios quando aplicados no UMo-Al /23/.

Baseado na pesquisa bibliográfica, foi estabelecida uma granulometria que será testada na fabricação das miniplacas, Tabela ?? /24/ /25/. Como pode ser observado na tabela 3.1, o tamanho máximo permitido das partículas foi reduzido do usual 150 μm para 125 μm .

Tabela 3.1 - Granulometria das partículas de UMo.

Tamanho da Partícula (μm)	Quantidade de Partículas Abaixo do Tamanho (%)
125	100,00
90	78,41
63	55,56
45	19,92

3.3.4 Massa Específica

A massa específica do pó de U7wt%Mo é 16,47 gU/cm³.

3.3.5 Dimensões da Miniplaca Combustível

As dimensões, tolerâncias e acabamentos superficiais especificados para a miniplaca combustível acabada são relacionados na Tabela 3.2 e indicadas na Figura 3.4.

Tabela 3.2 - Dimensões da minipla combustível U7wt%Mo-Al.

Discriminação	Especificação
Dimensões da miniplaca	
Comprimento (mm)	170 ± 1
Largura (mm)	$46,5 \pm 0,5$
Espessura (mm)	$1,52 \pm 0,05$
Dimensões do cerne	
Comprimento (mm)	118 ± 3
Largura (mm)	40 ± 3
Espessura (mm)	$0,76 \pm 0,05$
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	Zona 1 : 0,30 mm Zona 2: 0,25 mm

Figura 3.4: Dimensões das miniplacas combustíveis.

3.3.6 Miniplacas Combustíveis Fabricadas

Através da especificação técnica, 12 miniplacas foram fabricadas com a densidade de 4 gU/cm³ de urânio. Esta densidade foi escolhida devido estar próxima a que será usada no núcleo de equilíbrio do RMB com o combustível de U₃Si₂-Al.

A Figura 3.5 mostra as miniplacas fabricadas. A identificação delas foi gravada como U7MoE4-XX, onde:

Figura 3.5: Doze miniplacas combustíveis fabricadas.

- **U7Mo** refere-se ao combustível ser de Urânio - Molibdênio com o molibdênio na quantidade de 7% em massa;
- **E** indica que o combustível é enriquecido de ²³⁵U;
- **4** representa a densidade de urânio, que é de 4 gU/cm³ e
- **XX** é a numeração de cada placa, que vai de 01 à 12.

A informação da massa do combustível de cada miniplaca é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Massas das miniplacas combustíveis

Identificação	Massa de UMo (g)	Massa U (g)	Massa de Mo (g)	Enriquecimento (%)	Massa de ^{235}U (g)
U7MoE4-01	14,29	13,15	1,14	19,804	2,604
U7MoE4-02	14,37	13,22	1,15		2,618
U7MoE4-03	14,29	13,22	1,07		2,618
U7MoE4-04	14,30	13,16	1,14		2,606
U7MoE4-05	14,32	13,18	1,14		2,610
U7MoE4-06	14,25	13,11	1,14		2,596
U7MoE4-07	14,32	13,18	1,14		2,610
U7MoE4-08	14,27	13,13	1,14		2,600
U7MoE4-09	14,29	13,22	1,07		2,618
U7MoE4-10	14,28	13,14	1,14		2,602
U7MoE4-11	14,29	13,22	1,07		2,618
U7MoE4-12	14,30	13,16	1,14		2,606

Das 12 miniplacas fabricadas apenas as placas de 1 à 10 foram usadas na irradiação no núcleo do reator IPEN/MB-01. As placas 11 e 12 ficaram como referência de miniplacas não irradiadas.

3.4 Irradiador de Acrílico

Para a irradiação das miniplacas combustíveis no reator IPEN/MB-01, foi projetado um irradiador de acrílico como mostram as Figuras 3.6 e 3.7.

O irradiador foi projetado para que o centro das miniplacas fiquem na metade da parte ativa das varetas combustíveis do reator, altura de 364 mm Figura 3.6. O projeto completo do irradiador encontra-se no apêndice A.

A Figura 3.7 mostra o irradiador fabricado.

Figura 3.6: Projeto do irradiador de acrílico.

Figura 3.7: Irradiador de acrílico para as miniplacas combustíveis.

3.5 Irradiação das Miniplacas

Para determinar a reatividade inserida pelas miniplacas de $U7wt\%Mo-AL$ com 4 gU/cm^3 , no núcleo do reator IPEN/MB-01, são realizadas quatro configurações do núcleo do reator. As simulações foram realizadas usando o código MCNP-5 e os dados de entrada utilizados foram os modificados da referência /27/, com a temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. A descrição de cada configuração será dada a seguir.

1) Primeira Configuração

A primeira configuração é realizada com a configuração padrão 28×26 varetas com a retirada das seguintes varetas: colunas L a O e das linhas 13 a 16, totalizando 16 varetas retiradas do centro do núcleo, Figura 3.8. A potência de operação é de 1 W e após a

determinação da reatividade através do reatímetro o reator é desligado (scram).

Figura 3.8: Núcleo padrão (28 x 26) sem 16 varetas central.

2) Segunda Configuração

A segunda configuração é a do núcleo padrão retangular (28 x 26), com o irradiador (Figura 3.7) inserido na posição das varetas retiradas, como mostra a Figuras 3.9.

Figura 3.9: Núcleo do reator com o irradiador de acrílico (visão radial).

A Figura 3.10, mostra o eixo axial (altura) em que o ponto central das miniplacas fica na metade da parte ativa do núcleo do reator. A potência de operação é de 1 W e após a determinação da reatividade através do reatímetro o reator é desligado (scram).

Figura 3.10: Núcleo do reator com o irradiador de acrílico (visão axial).

3) Terceira Configuração

Na terceira configuração, as 10 miniplacas combustíveis foram colocadas no irradiador como mostra a Figura 3.11. A operação foi realizada a uma potência de 1 W e após a determinação da reatividade através do reatímetro, o reator foi desligado (scram). Os dados de entrada utilizados na simulação desta configuração estão no apêndice B.

Figura 3.11: Núcleo do reator com o irradiador de acrílico e miniplacas combustíveis.

4) Quarta Configuração

Na quarta configuração, o núcleo padrão é modificado com a retirada de varetas combustíveis. Foram retiradas 102 varetas combustíveis, como mostra a Figura 3.12, para obter uma “leve” supercríticidade com as barras de controle totalmente retiradas e com o irradiador inserido no centro do núcleo com as 10 miniplacas combustíveis. A reatividade é obtida com o reatímetro com o reator supercrítico. Os dados de entrada utilizados na simulação desta configuração estão no apêndice C.

Figura 3.12: Núcleo do reator modificado com o irradiador de acrílico e miniplacas combustíveis.

Resultados e Análise

4.0.1 Variação da Densidade de Urânio

A primeira comparação realizada foi entre o comportamento dos combustíveis $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ e UMo-Al (com 7 e 10% em massa de Mo) com a variação da densidade de urânio. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.1.

Figura 4.1: Comparação entre o $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ e UMo-Al com a variação da densidade de urânio.

Esta comparação foi obtida utilizando-se apenas o HRC, devido ao objetivo aqui ser a comparação entre os dois tipos de combustível.

O U_3Si_2 está qualificado para a densidade de até $4,8 \text{ gU/cm}^3$ e os demais pontos simulados foram apenas para comparação. O HRC calcula o valor do fator de multiplicação infinito (k_∞).

O (k_∞) não leva em consideração a fuga de nêutrons do sistema (sistema infinito) e é formado por quatro fatores como mostra a equação 1:

$$k_\infty = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f \quad (1)$$

Onde:

η é o número de nêutrons produzidos por fissão por nêutrons térmico absorvido;

ε é o fator de fissão rápido;

p é a probabilidade de escape da ressonância;

f é o fator de utilização térmica.

Como mostra a Figura 4.1, o comportamento dos combustíveis é bem diferente com a variação da densidade de urânio.

Esta diferença está relacionada com a diferença na seção de choque de absorção entre o Si e o Mo como mostra a Figura 2.2.

As Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 mostram a comparação entre o combustível $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ e o $\text{U7wt\%Mo-Al}$ para cada fator da fórmula dos quatro fatores que compõem a equação do K_∞ .

Figura 4.2: Fator η da fórmula dos quatro fatores.

Figura 4.3: Fator ϵ da fórmula dos quatro fatores.

Figura 4.4: Fator p da fórmula dos quatro fatores.

Figura 4.5: Fator f da fórmula dos quatro fatores.

Com os resultados apresentados é possível observar que o fator p , que é a probabilidade

de escape da ressonância, diminui mais acentuadamente no UMo-Al do que no $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$, isto quer dizer que mais nêutrons estão sendo absorvidos na liga de UMo. Uma parte dos nêutrons que são absorvidos são capturados pelo ^{238}U que forma o núcleo composto de ^{239}U , que decai para o ^{239}Np e depois para o ^{239}Pu . A conversão para ^{239}Pu é de extrema importância na queima do combustível pois, assim como o ^{235}U é um material físsil.

O comportamento durante a queima do combustível $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ com a densidade de 4 gU/cm^3 e do combustível de UMo-Al com a densidade de urânio entre 5 e 7 gU/cm^3 é apresentado nas Figuras 4.6 e 4.7. Estes resultados foram obtidos com o programa HRC.

Figura 4.6: Comparação entre a queima do combustível $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ e do $\text{U7wt\%Mo-Al}$.

Figura 4.7: Comparação entre a queima do combustível U_3Si_2-Al e do $U_{10wt\%}Mo-Al$.

Os resultados mostram que há uma inversão, para as densidades acima de 4 gU/cm^3 do combustível $UMo-Al$, durante a queima e que no final do período analisado (em torno de 100 dias) o combustível $UMo-Al$ apresenta valores do K_∞ maiores que o U_3Si_2-Al .

Os resultados mostram que é possível obter um ciclo de queima maior com o $UMo-Al$, com maior densidade de urânio, do que com o combustível U_3Si_2-Al com 4 gU/cm^3 . O ciclo de queima é maior no combustível $UMo-Al$ devido a conversão em $^{239}_{94}Pu$ ser maior no $UMo-Al$ do que no combustível de U_3Si_2-Al , como exemplifica a Figura 4.8 com a comparação entre a produção de plutônio 239 no U_3Si_2-Al com a densidade de urânio de 4 gU/cm^3 e no $UMo-Al$ com a densidade de 5 gU/cm^3 .

Figura 4.8: Comparação entre a conversão do ^{239}Pu no combustível $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ e no $\text{U7wt\%Mo-Al}$.

Devido a absorção de nêutrons no molibdênio ser considerável, a porcentagem de molibdênio escolhida para as demais análises foi de 7 % em massa (U7wt%Mo).

4.0.2 Veneno Queimável

Este trabalho tem como objetivo analisar a utilização de um elemento adicionado ao combustível que funcione como veneno queimável.

O método utilizado para adicionar a quantidade de veneno queimável no combustível foi adicionar uma porcentagem em massa do material (veneno) em relação a massa do combustível, por exemplo, se a massa do UMo for de 100g e o veneno estiver em uma porcentagem de 0,25% a quantidade em massa de veneno adicionada é de 0,25 g.

4.0.3 Gadolínio

O primeiro material analisado foi o gadolínio (Gd), que possui alta seção de choque de absorção de 49000 b /26/. Foram realizadas simulações com o programa HRC onde a porcentagem em massa de Gd variou de 0 (sem Gd) a 0,10 %, com densidade de urânio

5,55 gU/cm³ no combustível de U7wt%Mo-Al. A densidade de 5,55 gU/cm³ foi escolhida para esta análise por permitir um maior ciclo de queima, como as densidades de 6 e 7 gU/cm³, como mostram os resultados da Figura 4.6. Os resultados são apresentados na Figura 4.9.

Figura 4.9: Simulações com o programa HRC com a variação Gd entre 0 (sem Gd) a 0,10 % em massa.

Pela Figura 4.9 observa-se que o gadolínio causa uma grande perturbação na reatividade inicial do ciclo e que apenas quantidades entre 0,020 e 0,010 % permitem minimizar esta perturbação. Outro problema causado é a rápida “queima” do gadolínio que não permite um ciclo de operação do reator plano (reatividade constante) ao longo do tempo.

4.0.4 Európio

O európio possui uma seção de choque de absorção de 4600 b, menor que a do gadolínio, mas ainda assim alta /26/. Foram realizadas simulações com o programa CITATION onde

a porcentagem em massa de Eu variou de 0 (sem Eu) a 0,30%, com densidade de urânio $3,55 \text{ gU/cm}^3$ no combustível de $\text{U7wt\%Mo-Al}$. Esta densidade de urânio foi escolhida para a análise por estar próxima a densidade que será usada no RMB com o combustível de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$. Os resultados são apresentados na Figura 4.10. Os dados de entrada para a simulação com 0,25 % de Eu estão no apêndice D.

Figura 4.10: Simulações com o CITATION com a variação de Eu entre 0 a 0,30% em massa.

É possível notar pela Figura 4.10 que o európio permite um controle inicial melhor da reatividade do reator e ao longo do ciclo de operação, permitindo uma menor variação da reatividade ao longo do ciclo de 30 dias de operação. Estes resultados mostram que do ponto de vista neutrônico, o európio pode ser usado como veneno queimável para um reator com as características consideradas.

Destes resultados, considerou-se que a quantidade de európio que melhor atende ao ciclo do reator é a de 0,25%. Para este caso, também utilizou-se o programa SERPENT.

Os resultados obtidos com o CITATION e o SERPENT estão nas Tabelas 3.4 e Figura 4.11.

Com os resultados obtidos é possível verificar que os dois programas tem uma boa concordância entre si, ou seja, representam da mesma forma a geração do Xenônio (2 dias), o consumo do veneno (≈ 32 dias) e a depleção do combustível.

Tabela 4.1 - Valores de k para U7wt%Mo-Al com 3,55 gU/cm³ e 0,25% de Eu.

Dias	SERPENT (k)	$\sigma_{SERPENT}$	CITATION
0	1,10444	0,00012	1,09633
2	1,05857	0,00012	1,04969
7	1,05015	0,00012	1,04101
12	1,05117	0,00012	1,04085
17	1,05470	0,00012	1,04371
22	1,05879	0,00012	1,04673
27	1,06213	0,00012	1,04942
32	1,06362	0,00012	1,05056
37	1,06331	0,00012	1,05001
42	1,06140	0,00012	1,04817
47	1,05776	0,00012	1,04415
52	1,05277	0,00012	1,03937
57	1,04622	0,00012	1,03367
62	1,03899	0,00013	1,02613
67	1,03003	0,00012	1,01781
72	1,02124	0,00012	1,00925
77	1,01136	0,00013	0,99995
82	1,00104	0,00012	0,99015
87	0,99039	0,00013	0,97947
92	0,97882	0,00012	0,96827
97	0,96737	0,00013	0,95692

Figura 4.11: Valores de k para U7wt%Mo-Al com 3,55 gU/cm³ e 0,25% de Eu.

A diferença encontrada está relacionada à diferença da metodologia de cálculo utilizada em cada código. A metodologia que o SERPENT utiliza representa “melhor” a realidade física do problema, pois não se baseia em aproximações da metodologia de difusão utilizada.

As simulações não levam em consideração as demais partes do reator tais como: locais de irradiação, canais de irradiação (“*beam hole*”) e fonte de nêutrons frio. Estas partes absorvem nêutrons e diminuem a reatividade. A seção de física de reatores do Centro de Engenharia Nuclear (CEN) estima que estas partes consomem cerca de 3500 pcm de reatividade. Este valor serve apenas para de uma forma muito simplificada aproximar estas simulações para o caso real de funcionamento do RMB.

Os valores de reatividade calculados com o SERPENT e com o CITATION, descontados 3500 pcm, são apresentados na Tabela 4.1 e na Figura 4.12.

Tabela 4.2 - Reatividade para U7wt%Mo-Al com 3,55 gU/cm³ e 0,25% de Eu.

Dias	SERPENT (pcm)	CITATION (pcm)
0	5956	5287
2	2033	1234
7	1276	439
12	1368	425
17	1686	688
22	2053	964
27	2350	1209
32	2481	1313
37	2454	1270
42	2285	1096
47	1961	728
52	1512	288
57	918	-243
62	253	-954

Através da Tabela 4.1 e da Figura 4.12, é possível notar que a reatividade ao longo do ciclo permite uma operação do reator além de 30 dias. Os valores obtidos pelo SERPENT mostram que a princípio poderia se operar por aproximadamente 60 dias.

Estes resultados são qualitativos, pois esta análise foi realizada com apenas uma densidade de urânio no núcleo. Na realidade, o núcleo do reator possui elementos combustíveis com densidades de urânio diferentes, com elementos combustíveis com densidade menor no centro de reator (maior fluxo de nêutrons) e elementos com densidades maiores nas extremidades do núcleo (menor fluxo de nêutrons).

Figura 4.12: Reatividade para U7wt%Mo-Al com 3,55 gU/cm³ e 0,25% de Eu.

4.0.5 Ciclo de Operação

Através da função “*inventory*” do SERPENT, as concentrações dos núclídeos mais importantes para o ciclo de operação do reator foram geradas.

A razão entre a concentração final e inicial, Figura 4.13, mostra que no final de 100 dias de operação a quantidade de ²³⁵U utilizada foi de aproximadamente 43%.

Figura 4.13: Concentração total em átomo/b.cm para o ^{235}U ao longo da queima.

Como o ciclo desejado para o reator é de 30 dias e o período considerado foi de 97 dias, o que corresponde a aproximadamente 3 ciclos de operação do reator (90 dias), a porcentagem de consumo do combustível está abaixo da porcentagem que causa problemas de inchamento no combustível de UMo-Al, acima de 65 % de queima de urânio.

Este resultado mostra que a princípio o reator não teria problema em utilizar o combustível de UMo-Al sem adição de elementos de liga para evitar o inchamento.

A conversão do ^{238}U em ^{239}Pu (que é um material físsil) é mostrado na Figura 4.14. Como apresentado anteriormente, esta conversão é importante para o combustível de UMo-Al quando comparado com o $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$.

A Figura 4.15 mostra que conforme o ^{151}Eu sofre a reação de captura radiativa, ele se transforma em ^{152}Eu , que por sua vez também é consumido e a partir de 60 dias a quantidade de ambos é praticamente nula.

Figura 4.14: Concentração total em átomo/b.cm para o ^{238}U e ^{239}Pu ao longo da queima.

Figura 4.15: Concentração total em átomo/b.cm para o ^{151}Eu e ^{152}Eu ao longo da queima.

A Figura 4.16 mostra que concentração do ^{153}Eu aumenta até aproximadamente 45 dias e então começa a cair, mas ainda é considerável no final do ciclo e que a concentração do ^{154}Eu aumenta ao longo de todo o ciclo de operação.

A Figura 4.17 mostra que assim como o ^{154}Eu , a concentração do ^{155}Eu e do ^{156}Eu aumenta ao longo do ciclo como apresentado. Então, os resultados mostram que com a utilização do európio como veneno irá ocorrer uma concentração residual dos isótopos ^{154}Eu , ^{155}Eu e ^{156}Eu no final do ciclo.

Devido ao acúmulo dos isótopos do Eu citados, ao se comparar o ciclo do reator sem e com európio, nota-se que há uma diferença no final do ciclo, devido ao acúmulo dos isótopos de európio, Figura 4.18.

Figura 4.16: Concentração total em átomo/b.cm para o ^{153}Eu e ^{154}Eu ao longo da queima.

Figura 4.17: Concentração total em átomo/b.cm para o ^{155}Eu e ^{156}Eu ao longo da queima.

Figura 4.18: Comparação do ciclo sem veneno queimável e com európio.

4.0.6 Variação de Temperatura

Um fator importante de segurança relacionado a temperatura é a diminuição da reatividade com o aumento da temperatura (alpha iso). Para verificar a reatividade com o aumento da temperatura, foi simulado no CITATION e no SERPENT um aumento de temperatura de 30 °C para o núcleo selecionado (U7wt%Mo-Al com 3,55 gU/cm³ e 0,25% de Eu).

O HRC e o sistema modular AMPX-II foram utilizados para gerar os dados, com o aumento da temperatura do combustível e dos elementos estruturais do reator para o CITATION.

No SERPENT foi utilizado a função “*tmp*”. Devido a variação de temperatura ser baixa, o manual recomenda não utilizar esta função com grandes variações de temperatura em relação as temperaturas de sua biblioteca: 300, 600 e 1200 K.

Os valores de reatividade para 20 °C e 50 °C estão na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Variação da reatividade com o aumento da temperatura.

Código	20 °C	50 °C	Diferença	pcm/°C
CITATION	5287 (pcm)	4996 (pcm)	-291 (pcm)	9,7
SERPENT	5956 $\pm$ 11 (pcm)	5700 $\pm$ 11 (pcm)	-256 $\pm$ 16 (pcm)	8,5 $\pm$ 0,5

Os resultados obtidos com os dois programas mostram que a reatividade diminui com o aumento da temperatura, mostrando que é viável a utilização deste combustível proposto.

4.0.7 Adição de Silício

Embora não fosse o objetivo deste trabalho, estudar o comportamento do combustível com adição de elementos que possam evitar o seu inchamento acima de 65% de queima. Foi realizada uma simulação com o SERPENT com a adição de 6% em massa de silício, em relação ao combustível.

A Tabela 4.4 e a Figura 4.19 mostram que não há nenhuma alteação no ciclo de operação do reator devido a adição do silício.

Tabela 4.4 - Comparação entre a queima com e sem silício.

Dias	Sem Si	σ_{semSi}	Com Si	σ_{comSi}	Razão Sem/Com Si
0	1,10444	0,00012	1,10487	0,00012	99,96
2	1,05857	0,00012	1,05867	0,00012	99,99
7	1,05015	0,00012	1,05068	0,00013	99,95
12	1,05117	0,00012	1,05096	0,00012	100,02
17	1,05470	0,00012	1,05502	0,00012	99,97
22	1,05879	0,00012	1,05890	0,00012	99,99
27	1,06213	0,00012	1,06206	0,00012	100,01
32	1,06362	0,00012	1,06379	0,00012	99,98
37	1,06331	0,00012	1,06362	0,00011	99,97
42	1,06140	0,00012	1,06156	0,00012	99,98
47	1,05776	0,00012	1,05788	0,00012	99,99
52	1,05277	0,00012	1,05289	0,00012	99,99
57	1,04622	0,00012	1,04639	0,00012	99,98
62	1,03899	0,00013	1,03942	0,00012	99,96
67	1,03003	0,00012	1,03063	0,00012	99,94
72	1,02124	0,00012	1,02143	0,00012	99,98
77	1,01136	0,00013	1,01168	0,00013	99,97
82	1,00104	0,00012	1,00143	0,00013	99,96
87	0,99039	0,00013	0,99059	0,00013	99,98
92	0,97882	0,00012	0,97908	0,00013	99,97
97	0,96737	0,00013	0,96774	0,00013	99,96

Pela Tabela 4.4 é possível notar que há uma tendência dos valores com adição de silício serem maiores que os sem silício.

Esta variação ocorre, pois o silício tem uma seção de choque de espalhamento um pouco maior que o alumínio, porém como dito anteriormente esta variação é desprezível como mostra a Figura 4.19.

Figura 4.19: Comparação da queima com e sem adição de silício

4.0.8 Resultados Irradiação das Miniplacas

As operações do reator IPEN/MB-01 sem as barras de controle foram simuladas através do código MCNP-5 utilizando a biblioteca de dados ENDF/B-VII.0 com $2 \cdot 10^8$ histórias.

A simulação não leva em consideração a absorção de nêutrons pelos tubos guias dos detectores e pelos termopares que retiram do sistema 33,5 pcm /27/. Portanto, dos valores de reatividade obtidos na simulação foram subtraídos estes 33,5 pcm.

Os resultados das quatro configurações analisadas são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Simulações das operações de irradiação das miniplacas.

Configuração	K	σ_K	Reatividade (pcm)	$\sigma_{Reatividade}$ (pcm)
1 - 16 varetas centrais removidas	1.01128	0.00005	1082	5
2 - Irradiador inserido no centro do núcleo	1.01170	0.00005	1123	5
3 - Irradiador com as 10 miniplacas	1.01966	0.00005	1895	5
4 - Núcleo modificado com irradiador e 10 miniplacas	1.00128	0.00005	95	5

Para se obter o valor de reatividade inserida no núcleo do reator pelo irradiador de acrílico é necessário subtrair o valor de reatividade da configuração 1 da configuração 2.

Da mesma forma, para se obter o valor de reatividade inserida pelas miniplacas é necessário subtrair o valor de reatividade da configuração 2 da configuração 3.

A Tabela 4.6 apresenta os valores de reatividade devido a inserção do irradiador e miniplacas.

Tabela 4.6 - Simulação da reatividade inserida pelo irradiador e miniplacas.

Material	Reatividade Inserida (pcm)	$\sigma_{Reatividade}$ (pcm)
Irradiador	41	7
Miniplacas	772	7

Os resultados experimentais para as quatro configurações analisadas foram obtidos através do reatímetro. Para cada valor de reatividade é realizada uma média em um intervalo mínimo de 60 segundos.

Um exemplo de dois intervalos de medida na região crítica e supercrítica é apresentado na Figura 4.20.

Figura 4.20: Detalhe de duas regiões de medida do reatímetro.

Na configuração dois, após a criticalidade, as barras de controle foram colocadas na posição crítica da configuração 1. Assim sendo, a reatividade inserida pelo irradiador foi determinada. O valor de reatividade obtida com este procedimento, juntamente com as informações sobre a operação, é apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Segunda operação criticalidade inserida pelo irradiador.

Posição das Barras de Controle	Temperatura Média ($^{\circ}\text{C}$)	Reatividade Inserida (pcm)	$\sigma_{\text{Reatividade}}$ (pcm)
BC1 e BC2 - 73,31 %	$20,19 \pm 0.02$	2	1

O valor de reatividade das miniplacas é inferido a partir da diferença da posição crítica de barras de controle nas configurações 2 e 3. A medida foi iniciada a partir do ponto de criticalidade com a configuração 3. A barra de controle 1 (BC#1) é retirada de modo a deixar o reator supercrítico. Neste momento, a reatividade é medida e em seguida compensada com a inserção da barra de controle 2 (BC#2). Este procedimento é repetido

até que a BC#1 fique na posição crítica da configuração 2. A Figura 4.21 mostra os vários passos de reatividade ao longo de toda a medida. O procedimento é repetido para a BC#2, ou seja, retirada da BC#2 e inserção da BC#1 de modo a inferir a reatividade total.

Figura 4.21: Reatímetro ao longo de toda medida - terceira configuração.

As Tabelas 4.8 e 4.9 mostram a reatividade obtida em cada região (crítica e supercrítica) e a soma total da reatividade, sendo que a Tabela 4.8 é com a retirada da BC#1 e inserção da BC#2 e a Tabela 4.9 com a inserção da BC#1 e retirada da BC#2. A temperatura média do núcleo do reator durante a operação foi de $20,42 \pm 0,02$ °C.

Tabela 4.8 - Retirada da Barra BC#1

Posição BC#1 / BC#2	Detetor 1	σ_1	Detetor 2	σ_2	Média	$\sigma_{Média}$
63.48 / 63.48	0.2	1.7	0.2	1.6	0.2	1.2
65.32 / 63.48	80	1	81	1	80.5	0.7
65.32 / 61.69	-1.5	3	-1.5	3	-1.5	2.1
67.20 / 61.69	78	1	79	1	78.5	0.7
67.20 / 60.02	0.8	1.7	0.8	1.7	0.8	1.2
69.62 / 60.02	96.1	0.6	96.3	0.7	96.2	0.5
69.62 / 58.00	-0.4	1.7	-0.5	2	-0.5	1.3
72.51 / 58.00	106	1	106	2	106.0	1.1
72.51 / 55.83	-0.5	1.8	-0.6	1.5	-0.6	1.2
73.28 / 55.83	27	2	27	1	27.0	1.1
73.28 / 55.25	0.3	1.8	0.4	1.7	0.3	1.2
Soma					387	4

Tabela 4.9 - Retirada da Barra BC#2

Posição BC#1 / BC#2	Detetor 1	σ_1	Detetor 2	σ_2	Média	$\sigma_{Média}$
63.48/65.94	105	1	105	1	105.0	0.7
61.16/65.94	-1	3	-0.9	3	-0.9	2.1
61.16/68.27	95	1	95	1	95.0	0.7
59.16/68.27	0.8	2.1	0.9	2.1	0.8	1.5
59.16/71.01	105.3	0.7	105.2	0.9	105.2	0.6
56.97/71.01	-1	2	-1	2	-1.0	1.4
56.97/73.27	79	1	79	1	79.0	0.7
55.37/73.27	0.3	1.6	0.4	1.9	0.3	1.2
55.25/73.27	-6	2	-6	2	-6.0	1.4
Soma					380	4

Pela soma da reatividade inserida por todas as regiões é obtida a reatividade inserida pelas miniplacas que foi de 767 ± 6 pcm.

Na quarta configuração, o reator foi modificado com a retirada das varetas combustíveis. O reator foi colocado crítico com as barras de controle nas posições BC#1 = 99,62 % retirada e a BC#2 = 98,95 %. Após o pontos de criticalidade, as barras de controle

foram retiradas e o reator ficou “levemente” supercrítico. O valor de reatividade obtido é apresentado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Quarta configuração núcleo modificado.

Posição das Barras de Controle	Temperatura Média ($^{\circ}\text{C}$)	Reatividade Inserida (pcm)	$\sigma_{\text{Reatividade}}$ (pcm)
BC#1 e BC#2 - retiradas	$20,15 \pm 0,02$	5	8

4.0.9 Comparação Entre os Resultados Simulados E Experimentais

Os resultados das simulações e experimentais estão na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Resultados das simulações e experimentos.

Descrição	Simulação (pcm)	Experimental (pcm)
Irradiador	41 ± 7	2 ± 1
Miniplacas	772 ± 7	767 ± 6
Núcleo Modificado	95 ± 5	5 ± 8

Como mostra a Tabela 4.11, para o irradiador de acrílico o valor experimental obtido de inserção de reatividade é pequeno sendo praticamente desprezível. Já na simulação, o valor obtido ficou 39 pcm acima do experimental.

Analisando a inserção de reatividade das miniplacas os valores possuem baixa incerteza tanto nos valores simulados quanto experimentais. Através da metodologia utilizada foi possível observar que os dados simulados apresentaram alta concordância com os resultados experimentais, ou seja, esta metodologia representou adequadamente a realidade física do sistema das miniplacas combustíveis.

Dos valores obtidos, o de maior diferença entre simulado e medido foi com o núcleo modificado, porém, assim como no caso do irradiador, os valores de reatividade obtidos, tanto na simulação quanto no experimental, representam valores pequenos de reatividade.

Conclusões

Através da análise neutrônica, optou-se por estudar a aplicação do combustível UMo-Al com 7% em massa de Mo (U7wt%Mo), ao invés de usar 10 %, uma vez que a absorção de nêutrons pelo molibdênio é considerável.

Neste trabalho foi proposto que o veneno queimável seja aplicado diretamente na liga de UMo. Foram estudados dois elementos como veneno queimável: gadolínio e európio. Pelos resultados obtidos escolheu-se o Eu, pois este tem uma queima mais gradual do que o Gd e não causa uma grande variação da reatividade no início do ciclo de operação do reator.

Os resultados mostraram que com o combustível e o veneno queimável propostos, o ciclo de operação pode ultrapassar os 30 dias estipulados, o que contribui para otimização do reator e economia de combustível.

A análise dos resultados simulados para o aumento da temperatura mostrou que a reatividade diminui, sendo este um importante fator para a segurança do reator e mostrando viabilidade da utilização do combustível.

Com a simulação da adição de silício no combustível, foi observado que não há nenhuma mudança no ciclo de operação do reator devido a esta adição.

A partir da especificação técnica elaborada neste trabalho, foram fabricadas as 12 miniplacas combustíveis. As miniplacas foram irradiadas no centro do núcleo do reator IPEN/MB-01. O resultado obtido na simulação, para a reatividade inserida pelas miniplacas, teve uma alta concordância com os resultados experimentais. Portanto, a metodologia utilizada pode ser aplicada em futuros trabalhos com o combustível de UMo-Al que utilize európio como veneno queimável.

Trabalhos Futuros

Elaboração de uma especificação técnica de fabricação, em conjunto com o Centro do Combustível Nuclear (CCN), para a fabricação de miniplacas combustíveis de U7wt%Mo-Al com 4 gU/cm³ e 0,25 % em massa de Eu e adição de silício.

Irradiação das miniplacas combustíveis com Eu e Si no reator IPEN/MB-01 baseado na metodologia apresentada neste trabalho.

Apêndice

Irradiador De Acrílico

Figura A.1: Projeto do conjunto inteiro do irradiador de acrílico.

Figura A.2: Detalhe do suporte das miniplacas, parte superior do irradiador.

Figura A.3: Detalhe do suporte do irradiador, parte inferior do irradiador.

A seguir as informações do fabricante para o acrílico usado na fabricação do suporte das miniplacas, parte superior (primeira tabela) e inferior (segunda tabela - tubo) do irradiador.

Ficha Técnica – Acrigel® CT

Descrição

Acrigel® CT – Chapa acrílica feita pelo processo *cell cast* com excelente qualidade ótica, alta resistência em longo prazo, facilidade de moldagem, facilidade de desenvolvimento de cores e alta resistência química.

Propriedades	Método	Valores	Unidades
Propriedades físicas			
Densidade	ISO 1183	1,19	g/cm ³
Absorção de água (em água por 24 horas a 23°C)	ISO 62, método 1	0,3	%
Propriedades óticas			
Índice de refração	ISO 489 – método A	1,49	-
Transmitância total	ISO 13468-1	92	%
Propriedades mecânicas			
Resistência à tração (na ruptura)	ISO 527-2/1B/5	72	MPa
Alongamento (na ruptura)	ISO 527-2/1B/5	4,5	%
Módulo de Elasticidade	ISO 527-2/1B/1	3300	MPa
Resistência à flexão	ISO 178	110	MPa
Resistência ao impacto Charpy (entalhado)	ISO 179	14,5	kJ/m ²
Propriedades térmicas			
Temperatura de amolecimento Vicat	ISO 306/B/50	111	°C
Temperatura de deflexão térmica	ISO 75	97	°C
Máxima temperatura de uso contínuo	-	80	°C
Coefficiente de dilatação térmica linear (CLTE)	ASTM E-831	70	µm/m/°C
Flamabilidade			
Taxa de queima	ISO 3795	38	mm/min

Disponibilidade

Espessura – De 2 a 24mm*

Cores – Cristal / Branco / Diversas cores (consulte o departamento de vendas)

Tipos – Sanitárias / Texturizadas / Fosforescente / Metalizadas

* Tolerância da espessura conforme ISO 7823-1.

Nota:

Valores típicos. Não devem ser usados com a intenção de especificação. As normas acima citadas devem ser usadas como referência literária. As propriedades listadas podem ser afetadas pela quantidade e tipos de pigmentos.

Todas as informações presentes são dadas de boa fé. Não é uma garantia do produto. Contate nosso departamento de desenvolvimento de mercado e assistência técnica para a especificação do produto.

Acrigel® é uma marca registrada da Unigel Plásticos.
Última revisão: Julho/2009.

Unigel Plásticos S/A
Rua Luiz Feriani, 111 – Bairro Suisso
09663-100 – São Bernardo do Campo – SP – Brasil
Tel: (55 11) 4176-2700 Fax: (55 11) 4176-2757
www.unigel.com.br

Ficha Técnica – Acrigel® XT

Descrição

Acrigel® XT – Chapa acrílica extrudada com boa estabilidade de espessura, transparência, qualidade ótica e resistência à radiação ultravioleta.

Propriedades	Método	Valores	Unidade
Propriedades físicas			
Densidade	ISO 1183	1,19	g/cm ³
Absorção de água (em água por 24 horas a 23°C)	ISO 62, método 1	0,3	%
Propriedades óticas			
Índice de refração	ISO 489 – método A	1,49	-
Transmitância total	ISO 13468-1	92	%
Propriedades mecânicas			
Resistência à tração (na ruptura)	ISO 527-2/1B/5	61	MPa
Alongamento (na ruptura)	ISO 527-2/1B/5	2,7	%
Módulo de Elasticidade	ISO 527-2/1B/1	3090	MPa
Resistência à flexão	ISO 178	103	MPa
Resistência ao impacto Charpy (entalhado)	ISO 179	10,6	kJ/m ²
Propriedades térmicas			
Temperatura de amolecimento Vicat	ISO 306/B/50	108	°C
Temperatura de deflexão térmica	ISO 75	92	°C
Máxima temperatura de uso contínuo	-	70	°C
Coefficiente de dilatação térmico linear (CLTE)	ASTM E-831	70	µm/m/°C
Flamabilidade			
Taxa de queima	ISO 3795	38	mm/min

Disponibilidade

Espessura – De 2 a 20mm*

Cores – Cristal / Branco (Para outras cores consulte nosso departamento comercial)

* Tolerância da espessura conforme ISO 7823-2.

Nota:

Valores típicos. Não devem ser usados com a intenção de especificação. As normas acima citadas devem ser usadas como referência literária. As propriedades listadas podem ser afetadas pela quantidade e tipos de pigmentos.

Todas as informações presentes são dadas de boa fé. Não é uma garantia do produto. Contate nosso departamento de desenvolvimento de mercado e assistência técnica para a especificação do produto.

Acrigel® é uma marca registrada da Unigel Plásticos.
Última revisão: Janeiro/2010.

Unigel Plásticos S/A
Rua Luiz Feriani, 111 – Bairro Suisso
09663-100 – São Bernardo do Campo – SP – Brasil
Tel: (55 11) 4176-2700 Fax: (55 11) 4176-2757
www.unigel.com.br

[illegible]

```

c
c      ++++++ guide tube definition ++++++
c
150    4 1.00104e-01      -18      -24    u=3      $ guide tube (inside water)
160    9 8.430264e-02    18 -17      -24    u=3      $ guide tube (tube)
170    4 1.00104e-01      17          u=3      $ guide tube (outside water)
c
c      ++++++ Control rod BC#1 definition ++++++
c
c      ATTEMPT TO THE :
c
c      surface 31 which defines CONTROL ROD INSERTION POSITION
c
180    6 5.8233510e-02  -29      31 -24    u=5      $ control rod BC#1
190    2 -0.0001          29 -2     31 -24    u=5      $ gap
200    3 8.657158e-02    2  -3     31 -24    u=5      $ clad
210    4 1.00104e-01      3  -18     -24    u=5      $ water inside
220    9 8.430264e-02    18 -17     -24    u=5      $ guide tube (SS)
230    4 1.00104e-01      17          u=5      $ water outside
c      plug of control rod#1
240    3 8.657158e-02  -3          30 -31    u=5      $ control rod plug
250    4 1.00104e-01  -3          -30    u=5      $ water below control rod
c
c      ++++++ Control rod BC#2 definition ++++++
c
c      ATTEMPT TO THE :
c
c      surface 41 which defines CONTROL ROD INSERTION POSITION
c
260    6 5.8233510e-02  -29      41 -24    u=6      $ control rod BC#2
270    2 -0.0001          29 -2     41 -24    u=6      $ gap
280    3 8.657158e-02    2  -3     41 -24    u=6      $ clad
290    4 1.00104e-01      3  -18     -24    u=6      $ water inside
300    9 8.430264e-02    18 -17     -24    u=6      $ guide tube (SS)
310    4 1.00104e-01      17          u=6      $ water outside
c      plug of control rod#2
320    3 8.657158e-02  -3          40 -41    u=6      $ control rod plug
340    4 1.00104e-01  -3          -40    u=6      $ water below control rod
c
c      ++++++ single water cell ++++++
c
360    4 1.00104e-01          -24    u=7      $ water
c
c      ++++++ SS rod definition ++++++
c
c      Stainless Steel rod ——> -9.00 up to 98.600 cm
380    13 8.654509e-02  -38      25  -24    u=1      $ SS RODS

```

[illegible]

```

560      0
      (44 -15 14 -13 25 -24):
      (16 -45 14 -13 25 -24):
      (45 -44 14 -43 25 -24):
      (45 -44 42 -13 25 -24)
      fill=15
561      0 45 -44 43 -42 25 -24
      fill=11 (-.75 -.75 27.42)

c
c      ++++++ bottom plate (2.20 cm) ++++++
c
570      10 8.670304e-02 -34 35 -36 37 -25 32 $ bottom plate
c
c      ++++++ water around of 28x26 fuel rod array ++++++
c
580      4 1.00104e-01 -12 33 -50 #560 #570 #561 $ water around world
c
c
c ccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
c
c fuel plate
c -----/
601      12 5.50381E-02 -102 101 104 -103 106 -105 u=10 $ meat
c
602      14 6.00742E-02
      ( 104 -103 107 -101 112 -111 ):
      ( 104 -103 102 -108 112 -111 ): $ cladding
      ( 104 -103 102 -108 112 -111 ):
      (-102 101 104 -103 105 -111 119 ):
      (-102 101 104 -103 112 -106 ):
      ( 103 -109 107 -108 112 -111 119 ):
      ( 110 -104 107 -108 112 -111 119 )
      u=10
c
603      4 1.00104E-01
      ( 109 -113 107 -108 112 -111 ): $ camada de agua
      ( 114 -110 107 -108 112 -111 ):
      ( 114 -113 115 -107 112 -111 ):
      ( 114 -113 108 -116 112 -111 ):
      ( 114 -113 115 -116 -112 ):
      ( 114 -113 115 -116 111 ):
      ( 117 -118 113 ):
      ( 117 -118 -114 ):
      (-119 110 -109 )
      u=10
c
604      11 1.07933E-01

```

```
(-115      ): $ acrylic
( 116      ):
( 115 -117 113 ):
( 115 -117 -114 ):
( 118 -116 113 ):
( 118 -116 -114 )
u=10

c
c cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
c
605 11 1.07933E-01
    (134 -133 121 -120 112 -136 ):
    (134 -133 121 -117 136 -135 ): $ acrylic
    (134 -133 118 -120 136 -135 ):
    (134 -133 121 -120 135 -111 )
    u=11

c
606 0
    (133 -132 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0 -1.809 0 ) u=11
607 0
    (132 -131 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0 -1.407 0 ) u=11
608 0
    (131 -130 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0 -1.005 0 ) u=11
609 0
    (130 -129 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0 -0.603 0 ) u=11
610 0
    (129 -128 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0 -0.201 0 ) u=11
611 0
    (128 -127 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0 0.201 0 ) u=11
612 0
    (127 -126 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0 0.603 0 ) u=11
613 0
    (126 -125 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0 1.005 0 ) u=11
614 0
    (125 -124 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0 1.407 0 ) u=11
615 0
    (124 -123 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0 1.809 0 ) u=11

c
616 11 1.07933E-01
    (123 -122 121 -120 135 -111 ): $ acrylic
    (123 -122 121 -120 112 -136 ):
    (123 -122 121 -117 136 -135 ):
    (123 -122 118 -120 136 -135 )
    u=11

c
617 4 1.00104e-01
    ( 134 -133 117 -118 136 -135 ): $ agua buraco moldura
```

```
( 123 -122 117 -118 136 -135 ):
( 122 ):
(-134 ):
( 134 -122 -121 ):
( 134 -122 120 ):
( 134 -122 121 -120 111 ):
( 134 -122 121 -120 -137 138 141 ): $ envolta duto
(-142 138 -137 ): $ dentro duto
(-140 137 -112 ): $ buraco pl. apoio
( 134 -122 121 -120 -139 )
u=11
c
618 11 1.07933E-01
(134 -122 121 -120 -112 137 140) $ acrylic
u=11 $
619 11 1.07933E-01
(134 -122 121 -120 -138 139 ) $ acrylic
u=11 $
c
620 11 1.07933E-01
(-141 142 138 -137 ) $ acrylic
u=11 $
c
c cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
c
c
c ++++++++ outside of reactor tank ++++++++
999 0 12:50:-33 $ outside of world
c ——— SURFACE DEFINITIONS — All Dimension in Centimeters
c
c Surface cards ——> cz cylinder
c px,py and pz planes
c
1 cz 0.424470 $ uo2 pellet radius
2 cz 0.428730 $ clad inner radius
3 cz 0.490370 $ clad outer radius
4 px 0.750000 $ half pitch
5 px -0.750000 $ half pitch
6 py 0.750000 $ half pitch
7 py -0.750000 $ half pitch
8 pz 0.000000 $ axial origin
9 pz 54.84000 $ fuel rod length
12 cz 100.0000 $ reactor tank radius
13 px 20.25000 $ window boundary ( 20.250/1.50=13.5 )
14 px -21.75000 $ window boundary ( 21.750/1.50=14.5 )
15 py 18.75000 $ window boundary ( 18.750/1.50=12.5 )
```

```

16  py  -20.25000          $ window boundary ( 20.250/1.50=13.5 )
17  cz   0.600000         $ guide tube outer radius
18  cz   0.565000         $ guide tube inner radius
23  pz   60.24000         $ top aluminum height
24  pz   98.84000         $ spacer tube height
25  pz  -9.000000         $ bottom aluminum height
28  cz   0.365000         $ spacer tube inner radius
29  cz   0.416000         $ control rod inner radius
30  pz   53.17            $ end of plug ( 2/3 of 2.50 cm - cone shaped)
31  pz   54.84            $ active length of control rod (54.84 - 20.00)
32  pz  -11.20000         $ bottom SS grid plate
33  pz  -50.00000         $ bottom of reactor tank
34  px   29.40000         $ bottom grid plate +X
35  px  -29.40000         $ bottom grid plate -X
36  py   29.40000         $ bottom grid plate +Y
37  py  -29.40000         $ bottom grid plate -Y
38  cz   0.476250         $ SS rod radius
40  pz   53.17            $ end of plug
41  pz   54.84            $ active length of control rod (54.84 - 20.00)
c
c
42  px   2.2505
43  px  -3.7505
44  py   2.2505
45  py  -3.7505
c
c
50  pz  150.0000         $ top of reactor tank
c
c
c
c
101      px  -2
102      px   2
103      py  0.038
104      py -0.038
105      pz  5.9
106      pz -5.9
c
107      px -2.325
108      px  2.325
109      py  0.078
110      py -0.078
111      pz  8.5
112      pz -8.5
c
113      py  0.0805

```

```

114      py  -0.0805
c
115      px  -2.35
116      px   2.35
c
117      px  -2.1
118      px   2.1
c
119      c/y  0  7.5  0.415
c
c
120      px   2.6
121      px  -2.6
c
122      py  2.3875
123      py  1.8875
124      py  1.608
125      py  1.206
126      py  0.804
127      py  0.402
128      py   0
129      py -0.402
130      py -0.804
131      py -1.206
132      py -1.608
133      py -1.8875
134      py -2.3875
c
135      pz   8
136      pz  -8
c
137      pz  -9
138      pz -35.9
139      pz -36.4
c
140      cz   0.4
141      cz   2
142      cz   1.5
c
c
c
c

c
c   Cell importance definitions – Default values must be ONE
c
imp:n    1 1 1 1 1 1 1 1 1 1    1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

```


[illegible]

15.0	0.0	45.0	-15.0	0.0	45.0	12.0	15.0	45.0
15.0	-15.0	45.0	-15.0	-15.0	45.0	15.0	15.0	45.0
18.0	0.0	45.0	-15.0	-18.0	45.0	21.0	0.00	45.0
-21.0	0.0	45.0	-21.0	-21.0	45.0	21.0	-21.0	45.0
12.0	0.0	51.0	-12.0	0.0	51.0	12.0	12.0	51.0
12.0	-12.0	51.0	-12.0	-12.0	51.0	18.0	18.0	51.0
18.0	0.0	51.0	-18.0	-18.0	51.0	21.0	0.00	51.0
-21.0	0.0	51.0	-21.0	-21.0	51.0	21.0	-21.0	51.0
15.0	0.0	51.0	-15.0	0.0	51.0	12.0	15.0	51.0
15.0	-15.0	51.0	-15.0	-15.0	51.0	15.0	15.0	51.0
18.0	0.0	51.0	-15.0	-18.0	51.0	21.0	0.00	51.0
-21.0	0.0	51.0	-21.0	-21.0	51.0	21.0	-21.0	51.0

c

c material definitions

c ———> NNNNN.60c nuclide NNNNN from ENDF/B-VI cross section library

c ———> NNNNN.50c nuclide NNNNN from ENDF/B-V cross section library

c ———> nuclide concentration in atom/barn.cm

c

c m1 => UO2 pellet (U235, U238 and O16)

c m2 => gap (O16)

c m3 => SS304 clad (Fe, Ni, Cr, Mn, Si, P, C, S, Co and Mo)

c m4 => H2O (H and O)

c m5 => Alumina (Al O)

c m6 => AG-IN-CD Control ROD (Ag, In and Cd)

c m7 => SS304 Spacer Tube (Mn, Si, Ni, Cr, Fe, C, P and Co)

c m8 => baffle (not used)

c m9 => SS304 Guide Tube (Fe, Ni, Cr, Mn, Si, P, C, S, Co and Mo)

c m10 => SS304 Bottom Grid Plate(Fe, Ni, Cr, Mn, Si, P, C and S)

c m11 => SS control Rods

c

c UO2 - pellet region

m1 92235.70c 9.99240e-04 92238.70c 2.1694e-02 8016.70c 4.5489e-02

92234.70c 7.84620e-06

c Void (gap)

m2 8016.70c 0.0001

c SS304 - clad

m3 26054.70c 3.57366e-03 26056.70c 5.40491e-02 26057.70c 1.22693e-03

26058.70c 1.59256e-04

24050.70c 7.61902e-04 24052.70c 1.41123e-02 24053.70c 1.56980e-03

24054.70c 3.82755e-04

28058.70c 5.62942e-03 28060.70c 2.09590e-03 28061.70c 8.96301e-05

28062.70c 2.80805e-04 28064.70c 6.96915e-05

25055.70c 1.46450e-03 14028.70c 6.26555e-04 14029.70c 3.17252e-05

14030.70c 2.10595e-05 15031.70c 4.00400e-05 6000.70c 1.12390e-04

16032.70c 1.48393e-05 16033.70c 1.17128e-07 16034.70c 6.57476e-07

16036.70c 3.12340E-09 27059.70c 1.74020e-04 42092.70c 1.25428e-05

42094.70c 7.81810e-06 42095.70c 1.34556e-05 42096.70c 1.40979e-05

```

42097.70c 8.07166e-06 42098.70c 2.03947e-05 42100.70c 8.13928e-06
c      H2O — water
m4     1001.70c 6.67360e-02 8016.70c 3.33680e-02
mt4    lwtr.01t
c      Al2O3 — Alumina
m5     8016.70c 6.71160e-02 13027.70c 4.47440e-02
c      AG-IN-CD Control rods
m6     47107.70c 2.31847e-02 47109.70c 2.11443e-02
        49113.70c 3.36838e-04 49115.70c 7.51486e-03
        48106.70c 3.23675e-05 48108.70c 2.30457e-05 48110.70c 3.23416e-04
        48111.70c 3.31443e-04 48112.70c 6.24822e-04 48113.70c 3.16425e-04
        48114.70c 7.43935e-04 48116.70c 1.93946e-04
        6000.70c 1.50520e-03 16032.70c 1.78552e-04 16033.70c 1.40933e-06
        16034.70c 7.91101e-06 16036.70c 3.75820e-08
        8016.70c 1.77030e-03
c      SS304 — Spacer tube
m7     26054.70c 3.74872e-03 26056.70c 5.66967e-02 26057.70c 1.28703e-03
        26058.70c 1.67057e-04
        24050.70c 7.59839e-04 24052.70c 1.40741e-02 24053.70c 1.56555e-03
        24054.70c 3.81719e-04
        28058.70c 4.53128e-03 28060.70c 1.68705e-03 28061.70c 7.21458e-05
        28062.70c 2.26028e-04 28064.70c 5.60967e-05
        25055.70c 1.15810e-03 14028.70c 1.02883e-03 14029.70c 5.20939e-05
        14030.70c 3.45805e-05 15031.70c 3.11240e-05 6000.70c 2.40780e-04
        27059.70c 1.14500e-04
c      SS304 — Guide tube
m9     26054.70c 3.44894e-03 26056.70c 5.21628e-02 26057.70c 1.18411e-03
        26058.70c 1.53698e-04
        24050.70c 7.38069e-04 24052.70c 1.36708e-02 24053.70c 1.52070e-03
        24054.70c 3.70782e-04
        28058.70c 6.27853e-03 28060.70c 2.33757e-03 28061.70c 9.99650e-05
        28062.70c 3.13183e-04 28064.70c 7.77273e-05
        25055.70c 1.15010e-03 14028.70c 6.10286e-04 14029.70c 3.09014e-05
        14030.70c 2.05127e-05 15031.70c 4.50000e-05 6000.70c 8.89680e-05
c      SS304 — Bottom grid plate
m10    26054.70c 3.63630e-03 26056.70c 5.49964e-02 26057.70c 1.24843e-03
        26058.70c 1.62047e-04
        24050.70c 7.56501e-04 24052.70c 1.40122e-02 24053.70c 1.55868e-03
        24054.70c 3.80042e-04
        28058.70c 5.28566e-03 28060.70c 1.96791e-03 28061.70c 8.41568e-05
        28062.70c 2.63658e-04 28064.70c 6.54358e-05
        25055.70c 1.25030e-03 14028.70c 7.98859e-04 14029.70c 4.04497e-05
        14030.70c 2.68510e-05 42092.70c 4.42692e-06 42094.70c 2.75937e-06
        42095.70c 4.74910e-06 42096.70c 4.97581e-06 42097.70c 2.84886e-06
        42098.70c 7.19822e-06 42100.70c 2.87273e-06
        15031.70c 5.54400e-05 6000.70c 7.94260e-05 16032.70c 4.23979e-06
        16033.70c 3.34650e-08 16034.70c 1.87850e-07 16036.70c 8.92400e-10

```

```

c
c cccccccccccccccccccccccccccccc
c          acrylic          c
c cccccccccccccccccccccccccccccc
c
m11  1001.70c 5.79452E-02
      6000.70c 3.54893E-02
      8016.70c 1.44989E-02
c
c
c cccccccccccccccccccccccccccccc
c Comb. Miniplacas          c
c cccccccccccccccccccccccccccccc
c
m12  92234.70c 2.05212E-05 92235.70c 2.04339E-03 92238.70c 8.25424E-03
      42092.70c 3.33719E-04 42094.70c 2.03586E-04 42095.70c 3.46701E-04
      42096.70c 3.59468E-04 42097.70c 2.03689E-04 42092.70c 5.09409E-04
      42100.70c 1.99233E-04 13027.70c 4.18503E-02 26054.70c 6.27084E-06
      26056.70c 9.48379E-05 26057.70c 2.15291E-06 26058.70c 2.79443E-07
      29063.70c 3.52628E-05 29065.70c 1.57171E-05 24050.70c 1.14663E-06
      24052.70c 2.20865E-05 24053.70c 2.50414E-06 24054.70c 6.22081E-07
      12024.70c 4.00887E-04 12025.70c 5.07516E-05 12026.70c 5.58775E-05
      25055.70c 2.04121E-05 22046.70c 2.14689E-07 22047.70c 1.93611E-07
      22048.70c 1.91841E-06 22049.70c 1.40784E-07 22050.70c 1.34799E-07
      5010.70c 2.29355E-07 5011.70c 9.23167E-07 48106.70c 6.92768E-10
      48108.70c 4.93251E-10 48110.70c 6.92214E-09 48111.70c 7.09395E-09
      48112.70c 1.33732E-08 48113.70c 6.77250E-09 48114.70c 1.59226E-08
      48116.70c 4.15107E-09 27059.70c 1.26854E-06
c
c          encamisamento das barras de controle e de seguranca - SS304
m13  26054.70c 3.50278e-03 26056.70c 5.29770e-02 26057.70c 1.20259e-03
      26058.70c 1.56097e-04
      24050.70c 7.62733e-04 24052.70c 1.41277e-02 24053.70c 1.57152e-03
      24054.70c 3.83172e-04
      28058.70c 6.54682e-03 28060.70c 2.43746e-03 28061.70c 1.04236e-04
      28062.70c 3.26566e-04 28064.70c 8.10488e-05
      25055.70c 1.18080e-03 14028.70c 7.04878e-04 14029.70c 3.56910e-05
      14030.70c 2.36921e-05 15031.70c 4.15796e-05
      6000.70c 8.33972e-05 16032.70c 4.23983e-06 16033.70c 3.34653e-08
      16034.70c 1.87852e-07 16036.70c 8.92408e-10 27059.70c 1.37594e-04
      42092.70c 2.21343e-06 42094.70c 1.37967e-06 42095.70c 2.37452e-06
      42096.70c 2.48787e-06 42097.70c 1.42441e-06 42098.70c 3.59906e-06
      42100.70c 1.43634e-06 29063.70c 9.43728e-05 29065.70c 4.07687e-05
      50112.70c 3.30769e-08 50114.70c 2.17761e-08 50115.70c 1.12914e-08
      50116.70c 4.78714e-07 50117.70c 2.50690e-07 50118.70c 7.83891e-07
      50119.70c 2.75677e-07 50120.70c 1.03719e-06 50122.70c 1.44933e-07
      50124.70c 1.78316e-07

```

```

c
c
c ccccccccccccccccccccccccccc
c      Al6061      c
c ccccccccccccccccccccccccccc
c
c      12000.70 c    6.6229E-04
c      30000.70 c    0.0000E+00
c      22000.70 c    3.3959E-06
m14  13027.70 c      0.058811
      29063.70 c    4.6017e-005  29065.70 c    2.051e-005  24050.70 c    1.4946e-006
      24052.70 c    2.8822e-005  24053.70 c    3.2682e-006  24054.70 c    8.1352e-007
      12024.70 c      0.00052314  12025.70 c    6.6229e-005  12026.70 c    7.2918e-005
      14028.70 c      0.00035775  14029.70 c    1.8165e-005  14030.70 c    1.1974e-005
      26054.70 c    4.5947e-006  26056.70 c    7.2127e-005  26057.70 c    1.6657e-006
      26058.70 c    2.2168e-007  25055.70 c    2.6637e-005  22046.70 c    2.8016e-007
      22047.70 c    2.5265e-007  22048.70 c    2.5035e-006  22049.70 c    1.8372e-007
      22050.70 c    1.7591e-007  5010.70 c      2.9779e-007  5011.70 c      1.2062e-006
      48106.70 c    9.0404e-010  48108.70 c    6.4368e-010  48110.70 c    9.0332e-009
      48111.70 c    9.2574e-009  48112.70 c    1.7452e-008  48113.70 c    8.8379e-009
      48114.70 c    2.0778e-008  48116.70 c      5.417e-009  27059.70 c    1.6554e-006
      3006.70 c      1.778e-008  3007.70 c      2.1648e-007
c
prdmp 1j 500 -1
print

```



```

c
c      ++++++ guide tube definition ++++++
c
150    4 1.00104e-01      -18      -24    u=3      $ guide tube (inside water)
160    9 8.430264e-02    18 -17      -24    u=3      $ guide tube (tube)
170    4 1.00104e-01      17          u=3      $ guide tube (outside water)
c
c      ++++++ Control rod BC#1 definition ++++++
c
c      ATTEMPT TO THE :
c
c      surface 31 which defines CONTROL ROD INSERTION POSITION
c
180    6 5.8233510e-02  -29      31 -24    u=5      $ control rod BC#1
190    2 -0.0001        29 -2     31 -24    u=5      $ gap
200    3 8.657158e-02   2  -3     31 -24    u=5      $ clad
210    4 1.00104e-01    3  -18     -24    u=5      $ water inside
220    9 8.430264e-02   18 -17     -24    u=5      $ guide tube (SS)
230    4 1.00104e-01    17          u=5      $ water outside
c      plug of control rod#1
240    3 8.657158e-02  -3        30 -31    u=5      $ control rod plug
250    4 1.00104e-01  -3        -30    u=5      $ water below control rod
c
c      ++++++ Control rod BC#2 definition ++++++
c
c      ATTEMPT TO THE :
c
c      surface 41 which defines CONTROL ROD INSERTION POSITION
c
260    6 5.8233510e-02  -29      41 -24    u=6      $ control rod BC#2
270    2 -0.0001        29 -2     41 -24    u=6      $ gap
280    3 8.657158e-02   2  -3     41 -24    u=6      $ clad
290    4 1.00104e-01    3  -18     -24    u=6      $ water inside
300    9 8.430264e-02   18 -17     -24    u=6      $ guide tube (SS)
310    4 1.00104e-01    17          u=6      $ water outside
c      plug of control rod#2
320    3 8.657158e-02  -3        40 -41    u=6      $ control rod plug
340    4 1.00104e-01  -3        -40    u=6      $ water below control rod
c
c      ++++++ single water cell ++++++
c
360    4 1.00104e-01          -24    u=7      $ water
c
c      ++++++ SS rod definition ++++++
c
c      Stainless Steel rod ——> -9.00 up to 98.600 cm
380    13 8.654509e-02  -38      25  -24    u=1      $ SS RODS

```

[illegible]


```

560      0
      (44 -15 14 -13 25 -24):
      (16 -45 14 -13 25 -24):
      (45 -44 14 -43 25 -24):
      (45 -44 42 -13 25 -24)
      fill=15
561      0 45 -44 43 -42 25 -24
      fill=11 (-.75 -.75 27.42)

c
c      ++++++ bottom plate (2.20 cm) ++++++
c
570      10 8.670304e-02 -34 35 -36 37 -25 32 $ bottom plate
c
c      ++++++ water around of 28x26 fuel rod array ++++++
c
580      4 1.00104e-01 -12 33 -50 #560 #570 #561 $ water around world
c
c
c ccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
c
c fuel plate
c -----/
601      12 5.50381E-02 -102 101 104 -103 106 -105 u=10 $ meat
c
602      14 6.00742E-02
      ( 104 -103 107 -101 112 -111 ):
      ( 104 -103 102 -108 112 -111 ): $ cladding
      ( 104 -103 102 -108 112 -111 ):
      (-102 101 104 -103 105 -111 119 ):
      (-102 101 104 -103 112 -106 ):
      ( 103 -109 107 -108 112 -111 119 ):
      ( 110 -104 107 -108 112 -111 119 )
      u=10
c
603      4 1.00104e-01
      ( 109 -113 107 -108 112 -111 ): $ camada de agua
      ( 114 -110 107 -108 112 -111 ):
      ( 114 -113 115 -107 112 -111 ):
      ( 114 -113 108 -116 112 -111 ):
      ( 114 -113 115 -116 -112 ):
      ( 114 -113 115 -116 111 ):
      ( 117 -118 113 ):
      ( 117 -118 -114 ):
      (-119 110 -109 )
      u=10
c
604      11 1.07933E-01

```

```
(-115          ): $ acrylic
( 116          ):
( 115 -117   113 ):
( 115 -117 -114 ):
( 118 -116   113 ):
( 118 -116 -114 )
u=10
c
c
c cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
c
c fuel plate
c -----/
701      4 1.00104e-01
         -102 101 104 -103 106 -105 u=12 $ meat
c
702      4 1.00104e-01
( 104 -103 107 -101 112 -111       ):
( 104 -103 102 -108 112 -111       ): $ cladding
( 104 -103 102 -108 112 -111       ):
(-102  101 104 -103 105 -111 119 ):
(-102  101 104 -103 112 -106       ):
( 103 -109 107 -108 112 -111 119 ):
( 110 -104 107 -108 112 -111 119 )
u=12
c
703      4 1.00104e-01
( 109 -113 107 -108 112 -111 ): $ camada de agua
( 114 -110 107 -108 112 -111 ):
( 114 -113 115 -107 112 -111 ):
( 114 -113 108 -116 112 -111 ):
( 114 -113 115 -116 -112        ):
( 114 -113 115 -116 111         ):
( 117 -118 113                  ):
( 117 -118 -114                 ):
(-119 110 -109                   )
u=12
c
704     11 1.07933E-01
(-115          ): $ acrylic
( 116          ):
( 115 -117   113 ):
( 115 -117 -114 ):
( 118 -116   113 ):
( 118 -116 -114 )
u=12
c
```

```
c
c
c cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
c
605   11  1.07933E-01
      (134 -133 121 -120 112 -136 ):
      (134 -133 121 -117 136 -135 ): $ acrylic
      (134 -133 118 -120 136 -135 ):
      (134 -133 121 -120 135 -111 )
      u=11
c
606   0
      (133 -132 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0 -1.809 0 ) u=11
607   0
      (132 -131 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0 -1.407 0 ) u=11
608   0
      (131 -130 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0 -1.005 0 ) u=11
609   0
      (130 -129 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0 -0.603 0 ) u=11
610   0
      (129 -128 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0 -0.201 0 ) u=11
611   0
      (128 -127 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0  0.201 0 ) u=11
612   0
      (127 -126 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0  0.603 0 ) u=11
613   0
      (126 -125 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0  1.005 0 ) u=11
614   0
      (125 -124 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0  1.407 0 ) u=11
615   0
      (124 -123 121 -120 112 -111 ) fill=10 (0  1.809 0 ) u=11
c
616   11  1.07933E-01
      (123 -122 121 -120 135 -111 ): $ acrylic
      (123 -122 121 -120 112 -136 ):
      (123 -122 121 -117 136 -135 ):
      (123 -122 118 -120 136 -135 )
      u=11
c
617   4  1.00104e-01
      ( 134 -133  117 -118  136 -135 ): $ agua buraco moldura
      ( 123 -122  117 -118  136 -135 ):
      ( 122                                     ):
      (-134                                    ):
      ( 134 -122 -121                          ):
      ( 134 -122  120                          ):
```

```
( 134 -122 121 -120 111 ) :  
 ( 134 -122 121 -120 -137 138 141 ): $ envolta duto  
 (-142 138 -137 ) : $ dentro duto  
 (-140 137 -112 ) : $ buraco pl. apoio  
 ( 134 -122 121 -120 -139 )  
 u=11  
  
c  
618 11 1.07933E-01  
 (134 -122 121 -120 -112 137 140) $ acrylic  
 u=11 $  
619 11 -1.190000  
 (134 -122 121 -120 -138 139 ) $ acrylic  
 u=11 $  
  
c  
620 11 1.07933E-01  
 (-141 142 138 -137 ) $ acrylic  
 u=11 $  
  
c  
c cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc  
c  
c  
c  
c ++++++++ outside of reactor tank ++++++++  
999 0 12:50:-33 $ outside of world  
  
c ——— SURFACE DEFINITIONS — All Dimension in Centimeters  
c  
c Surface cards ——> cz cylinder  
c px,py and pz planes  
c  
1 cz 0.424470 $ uo2 pellet radius  
2 cz 0.428730 $ clad inner radius  
3 cz 0.490370 $ clad outer radius  
4 px 0.750000 $ half pitch  
5 px -0.750000 $ half pitch  
6 py 0.750000 $ half pitch  
7 py -0.750000 $ half pitch  
8 pz 0.000000 $ axial origin  
9 pz 54.84000 $ fuel rod length  
12 cz 100.0000 $ reactor tank radius  
13 px 20.25000 $ window boundary ( 20.250/1.50=13.5 )  
14 px -21.75000 $ window boundary ( 21.750/1.50=14.5 )  
15 py 18.75000 $ window boundary ( 18.750/1.50=12.5 )  
16 py -20.25000 $ window boundary ( 20.250/1.50=13.5 )  
17 cz 0.600000 $ guide tube outer radius  
18 cz 0.565000 $ guide tube inner radius  
23 pz 60.24000 $ top aluminum height  
24 pz 98.84000 $ spacer tube heighth
```

```

25  pz  -9.000000      $ bottom aluminum height
28  cz   0.365000      $ spacer tube inner radius
29  cz   0.416000      $ control rod inner radius
30  pz   53.17         $ end of plug   ( 2/3 of 2.50 cm – cone shaped)
31  pz   54.84         $ active length of control rod (54.84 – 20.00)
32  pz  -11.20000      $ bottom SS grid plate
33  pz  -50.00000      $ bottom of reactor tank
34  px   29.40000      $ bottom grid plate +X
35  px  -29.40000      $ bottom grid plate -X
36  py   29.40000      $ bottom grid plate +Y
37  py  -29.40000      $ bottom grid plate -Y
38  cz   0.476250      $ SS rod radius
40  pz   53.17         $ end of plug
41  pz   54.84         $ active length of control rod (54.84 – 20.00)
c
c
42  px   2.2505
43  px  -3.7505
44  py   2.2505
45  py  -3.7505
c
c
50  pz  150.0000      $ top of reactor tank
c
c
c
c
101      px  -2
102      px   2
103      py  0.038
104      py -0.038
105      pz  5.9
106      pz -5.9
c
107      px -2.325
108      px  2.325
109      py  0.078
110      py -0.078
111      pz  8.5
112      pz -8.5
c
113      py  0.0805
114      py -0.0805
c
115      px -2.35
116      px  2.35
c

```

```

117      px  -2.1
118      px   2.1
c
119      c/y  0  7.5  0.415
c
c
120      px   2.6
121      px  -2.6
c
122      py  2.3875
123      py  1.8875
124      py  1.608
125      py  1.206
126      py  0.804
127      py  0.402
128      py   0
129      py -0.402
130      py -0.804
131      py -1.206
132      py -1.608
133      py -1.8875
134      py -2.3875
c
135      pz   8
136      pz  -8
c
137      pz  -9
138      pz -35.9
139      pz -36.4
c
140      cz   0.4
141      cz   2
142      cz   1.5
c
c
c
c
c      Cell importance definitions — Default values must be ONE
c
imp:n    1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
        1 1 1 1 1 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 1 1 1 1 1 1 1
        1 1 1 1 1 1 0
c
c      criticality calculation setup — number of generation and particles

```

[illegible]

```

12.0 -12.0 51.0      -12.0 -12.0 51.0      18.0 18.0 51.0
18.0 0.0 51.0       -18.0 -18.0 51.0      21.0 0.00 51.0
-21.0 0.0 51.0      -21.0 -21.0 51.0      21.0 -21.0 51.0
15.0 0.0 51.0       -15.0 0.0 51.0       12.0 15.0 51.0
15.0 -15.0 51.0     -15.0 -15.0 51.0      15.0 15.0 51.0
18.0 0.0 51.0       -15.0 -18.0 51.0      21.0 0.00 51.0
-21.0 0.0 51.0      -21.0 -21.0 51.0      21.0 -21.0 51.0

c
c      material definitions
c      ———> NNNNN.60c  nuclide NNNNN from ENDF/B-VI cross section library
c      ———> NNNNN.50c  nuclide NNNNN from ENDF/B-V  cross section library
c      ———>  nuclide concentration in  atom/barn.cm
c
c      m1 => UO2 pellet ( U235, U238 and O16)
c      m2 => gap  ( O16 )
c      m3 => SS304 clad ( Fe, Ni, Cr, Mn, Si, P, C, S, Co and Mo)
c      m4 => H2O ( H and O )
c      m5 => Alumina ( Al O )
c      m6 => AG-IN-CD Control ROD ( Ag, In and Cd )
c      m7 => SS304 Spacer Tube ( Mn, Si, Ni, Cr, Fe, C, P and Co)
c      m8 => baffle (not used)
c      m9 => SS304 Guide Tube ( Fe, Ni, Cr, Mn, Si, P, C, S, Co and Mo)
c      m10 => SS304 Bottom Grid Plate( Fe, Ni, Cr, Mn, Si, P, C and S)
c      m11 => SS control Rods
c
c      UO2 – pellet region
m1  92235.70c 9.99240e-04 92238.70c 2.1694e-02 8016.70c 4.5489e-02
    92234.70c 7.84620e-06
c      Void (gap)
m2  8016.70c 0.0001
c      SS304 – clad
m3  26054.70c 3.57366e-03 26056.70c 5.40491e-02 26057.70c 1.22693e-03
    26058.70c 1.59256e-04
    24050.70c 7.61902e-04 24052.70c 1.41123e-02 24053.70c 1.56980e-03
    24054.70c 3.82755e-04
    28058.70c 5.62942e-03 28060.70c 2.09590e-03 28061.70c 8.96301e-05
    28062.70c 2.80805e-04 28064.70c 6.96915e-05
    25055.70c 1.46450e-03 14028.70c 6.26555e-04 14029.70c 3.17252e-05
    14030.70c 2.10595e-05 15031.70c 4.00400e-05 6000.70c 1.12390e-04
    16032.70c 1.48393e-05 16033.70c 1.17128e-07 16034.70c 6.57476e-07
    16036.70c 3.12340E-09 27059.70c 1.74020e-04 42092.70c 1.25428e-05
    42094.70c 7.81810e-06 42095.70c 1.34556e-05 42096.70c 1.40979e-05
    42097.70c 8.07166e-06 42098.70c 2.03947e-05 42100.70c 8.13928e-06
c      H2O – water
m4  1001.70c 6.67360e-02 8016.70c 3.33680e-02
mt4 lwtr.01t
c      Al2O3 – Alumina

```



```

m5      8016.70c 6.71160e-02 13027.70c 4.47440e-02
c      AG-IN-CD Control rods
m6      47107.70c 2.31847e-02 47109.70c 2.11443e-02
        49113.70c 3.36838e-04 49115.70c 7.51486e-03
        48106.70c 3.23675e-05 48108.70c 2.30457e-05 48110.70c 3.23416e-04
        48111.70c 3.31443e-04 48112.70c 6.24822e-04 48113.70c 3.16425e-04
        48114.70c 7.43935e-04 48116.70c 1.93946e-04
        6000.70c 1.50520e-03 16032.70c 1.78552e-04 16033.70c 1.40933e-06
        16034.70c 7.91101e-06 16036.70c 3.75820e-08
        8016.70c 1.77030e-03
c      SS304 - Spacer tube
m7      26054.70c 3.74872e-03 26056.70c 5.66967e-02 26057.70c 1.28703e-03
        26058.70c 1.67057e-04
        24050.70c 7.59839e-04 24052.70c 1.40741e-02 24053.70c 1.56555e-03
        24054.70c 3.81719e-04
        28058.70c 4.53128e-03 28060.70c 1.68705e-03 28061.70c 7.21458e-05
        28062.70c 2.26028e-04 28064.70c 5.60967e-05
        25055.70c 1.15810e-03 14028.70c 1.02883e-03 14029.70c 5.20939e-05
        14030.70c 3.45805e-05 15031.70c 3.11240e-05 6000.70c 2.40780e-04
        27059.70c 1.14500e-04
c      SS304 - Guide tube
m9      26054.70c 3.44894e-03 26056.70c 5.21628e-02 26057.70c 1.18411e-03
        26058.70c 1.53698e-04
        24050.70c 7.38069e-04 24052.70c 1.36708e-02 24053.70c 1.52070e-03
        24054.70c 3.70782e-04
        28058.70c 6.27853e-03 28060.70c 2.33757e-03 28061.70c 9.99650e-05
        28062.70c 3.13183e-04 28064.70c 7.77273e-05
        25055.70c 1.15010e-03 14028.70c 6.10286e-04 14029.70c 3.09014e-05
        14030.70c 2.05127e-05 15031.70c 4.50000e-05 6000.70c 8.89680e-05
c      SS304 - Bottom grid plate
m10     26054.70c 3.63630e-03 26056.70c 5.49964e-02 26057.70c 1.24843e-03
        26058.70c 1.62047e-04
        24050.70c 7.56501e-04 24052.70c 1.40122e-02 24053.70c 1.55868e-03
        24054.70c 3.80042e-04
        28058.70c 5.28566e-03 28060.70c 1.96791e-03 28061.70c 8.41568e-05
        28062.70c 2.63658e-04 28064.70c 6.54358e-05
        25055.70c 1.25030e-03 14028.70c 7.98859e-04 14029.70c 4.04497e-05
        14030.70c 2.68510e-05 42092.70c 4.42692e-06 42094.70c 2.75937e-06
        42095.70c 4.74910e-06 42096.70c 4.97581e-06 42097.70c 2.84886e-06
        42098.70c 7.19822e-06 42100.70c 2.87273e-06
        15031.70c 5.54400e-05 6000.70c 7.94260e-05 16032.70c 4.23979e-06
        16033.70c 3.34650e-08 16034.70c 1.87850e-07 16036.70c 8.92400e-10
c
c      cccccccccccccccccccccccccc
c      acrylic c
c      cccccccccccccccccccccccccc
c

```

```

m11  1001.70c 5.79452E-02
      6000.70c 3.54893E-02
      8016.70c 1.44989E-02

c
c
c cccccccccccccccccccccccccc
c Comb. Miniplacas          c
c cccccccccccccccccccccccccc
c
m12   92234.70c 2.05212E-05 92235.70c 2.04339E-03 92238.70c 8.25424E-03
      42092.70c 3.33719E-04 42094.70c 2.03586E-04 42095.70c 3.46701E-04
      42096.70c 3.59468E-04 42097.70c 2.03689E-04 42092.70c 5.09409E-04
      42100.70c 1.99233E-04 13027.70c 4.18503E-02 26054.70c 6.27084E-06
      26056.70c 9.48379E-05 26057.70c 2.15291E-06 26058.70c 2.79443E-07
      29063.70c 3.52628E-05 29065.70c 1.57171E-05 24050.70c 1.14663E-06
      24052.70c 2.20865E-05 24053.70c 2.50414E-06 24054.70c 6.22081E-07
      12024.70c 4.00887E-04 12025.70c 5.07516E-05 12026.70c 5.58775E-05
      25055.70c 2.04121E-05 22046.70c 2.14689E-07 22047.70c 1.93611E-07
      22048.70c 1.91841E-06 22049.70c 1.40784E-07 22050.70c 1.34799E-07
      5010.70c 2.29355E-07 5011.70c 9.23167E-07 48106.70c 6.92768E-10
      48108.70c 4.93251E-10 48110.70c 6.92214E-09 48111.70c 7.09395E-09
      48112.70c 1.33732E-08 48113.70c 6.77250E-09 48114.70c 1.59226E-08
      48116.70c 4.15107E-09 27059.70c 1.26854E-06

c
c      encamisamento das barras de controle e de seguranca - SS304
m13   26054.70c 3.50278e-03 26056.70c 5.29770e-02 26057.70c 1.20259e-03
      26058.70c 1.56097e-04
      24050.70c 7.62733e-04 24052.70c 1.41277e-02 24053.70c 1.57152e-03
      24054.70c 3.83172e-04
      28058.70c 6.54682e-03 28060.70c 2.43746e-03 28061.70c 1.04236e-04
      28062.70c 3.26566e-04 28064.70c 8.10488e-05
      25055.70c 1.18080e-03 14028.70c 7.04878e-04 14029.70c 3.56910e-05
      14030.70c 2.36921e-05 15031.70c 4.15796e-05
      6000.70c 8.33972e-05 16032.70c 4.23983e-06 16033.70c 3.34653e-08
      16034.70c 1.87852e-07 16036.70c 8.92408e-10 27059.70c 1.37594e-04
      42092.70c 2.21343e-06 42094.70c 1.37967e-06 42095.70c 2.37452e-06
      42096.70c 2.48787e-06 42097.70c 1.42441e-06 42098.70c 3.59906e-06
      42100.70c 1.43634e-06 29063.70c 9.43728e-05 29065.70c 4.07687e-05
      50112.70c 3.30769e-08 50114.70c 2.17761e-08 50115.70c 1.12914e-08
      50116.70c 4.78714e-07 50117.70c 2.50690e-07 50118.70c 7.83891e-07
      50119.70c 2.75677e-07 50120.70c 1.03719e-06 50122.70c 1.44933e-07
      50124.70c 1.78316e-07

c
c
c cccccccccccccccccccccccccc
c      Al6061          c
c cccccccccccccccccccccccccc

```

```

c
c      12000.70 c      6.6229E-04
c      30000.70 c      0.0000E+00
c      22000.70 c      3.3959E-06
m14    13027.70 c      0.058811
      29063.70 c      4.6017e-005  29065.70 c      2.051e-005  24050.70 c      1.4946e-006
      24052.70 c      2.8822e-005  24053.70 c      3.2682e-006  24054.70 c      8.1352e-007
      12024.70 c      0.00052314  12025.70 c      6.6229e-005  12026.70 c      7.2918e-005
      14028.70 c      0.00035775  14029.70 c      1.8165e-005  14030.70 c      1.1974e-005
      26054.70 c      4.5947e-006  26056.70 c      7.2127e-005  26057.70 c      1.6657e-006
      26058.70 c      2.2168e-007  25055.70 c      2.6637e-005  22046.70 c      2.8016e-007
      22047.70 c      2.5265e-007  22048.70 c      2.5035e-006  22049.70 c      1.8372e-007
      22050.70 c      1.7591e-007  5010.70 c      2.9779e-007  5011.70 c      1.2062e-006
      48106.70 c      9.0404e-010  48108.70 c      6.4368e-010  48110.70 c      9.0332e-009
      48111.70 c      9.2574e-009  48112.70 c      1.7452e-008  48113.70 c      8.8379e-009
      48114.70 c      2.0778e-008  48116.70 c      5.417e-009  27059.70 c      1.6554e-006
      3006.70 c      1.778e-008  3007.70 c      2.1648e-007
c
prdmp 1j 500 -1
print

```

D

Dados De Entrada Do CITATION

Simulação com U-7Mowt%Mo com 3,5 gU/cm3 e 0,25 % de Eu

000

4

001

1 0 0 -1 -1 0
1 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0

999999

2.5 0.1

002

1 21 1 1

2.0 5.0

1 2 0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
0.0 1.45484E+03 5.09194E+03 8.72903E+03 1.23661E+04 1.60032E+04
1.96403E+04 2.32774E+04 2.69145E+04 3.05516E+04 3.41887E+04 3.78258E+04
4.14629E+04 4.51000E+04 4.87371E+04 5.23742E+04 5.60113E+04 5.96484E+04
6.32855E+04 6.69226E+04 7.05597E+04

003

0 0 0 0 11 1 1 1 1 1 1 0 1
0.00001 0.0001
30.0 1.00

004

27 40.00 1 0.50 33 50.00 1 0.50 7 8.15 2 2.10
7 8.15 7 8.15 7 8.15 2 2.10 7 8.15 1 0.50
33 50.00 1 0.50 27 40.00
27 40.00 1 0.50 33 50.00 1 0.50 1 0.55 8 7.05
1 0.55 1 0.55 8 7.05 1 0.55 1 0.55 8 7.05
1 0.55 1 0.55 8 7.05 1 0.55 1 0.55 8 7.05
1 0.55 1 0.50 33 50.00 1 0.50 27 40.00
13 19.25 1 0.50 10 15.38 10 15.38 10 15.38 10 15.38
1 0.50 13 19.25

005

2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 —Pisc Super—
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2

—Part Ativ 1—

2	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	7	1	27	47	59	1	79	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	11	1	31	6	63	1	83	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	15	1	35	51	67	1	87	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	19	1	39	6	71	1	91	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	23	1	43	55	75	1	95	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	2
2	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	2
2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
2	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	2
2	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	8	1	28	48	60	1	80	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	12	1	32	6	64	1	84	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	16	1	36	52	68	1	88	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	20	1	40	6	72	1	92	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	24	1	44	56	76	1	96	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	2
2	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	2
2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
2	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	2
2	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	2

—Part Ativ 2—

—Part Ativ 3—

2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	9	1	29	49	61	1	81	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	13	1	33	6	65	1	85	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	17	1	37	53	69	1	89	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	21	1	41	6	73	1	93	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	25	1	45	57	77	1	97	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	2
2	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	2
2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
2	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	2
2	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	10	1	30	50	62	1	82	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	14	1	34	6	66	1	86	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	18	1	38	54	70	1	90	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	22	1	42	6	74	1	94	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	6	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	26	1	46	58	78	1	98	4	3	4	2
2	4	3	4	5	1	5	5	5	1	5	4	3	4	2
2	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	2
2	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	2
2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
2	4	4	4	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	2

—Part Ativ 4—

—Tamp Al inf—

[illegible]

[illegible]

0.0	6.95000E-02	6.71300E-02	6.15100E-02	0.0	0.0
5.88300E-02	0.0	0.0	0.0		
	51	0.0	9.67000E-03	2.47000E-02	3.97500E-02
0.0	5.40500E-02	5.54900E-02	6.14600E-02	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0		
	52	0.0	2.88300E-02	3.03400E-02	2.59400E-02
0.0	3.86900E-02	3.54400E-02	2.84300E-02	0.0	0.0
2.75800E-02	0.0	0.0	0.0		
	57	0.0	6.29700E-02	5.63100E-02	6.83500E-02
0.0	6.44900E-02	6.74800E-02	7.07000E-02	0.0	0.0
6.90000E-02	0.0	0.0	0.0		
	58	0.0	2.42000E-03	1.58000E-03	2.80000E-04
0.0	1.15200E-02	6.98000E-03	2.31000E-03	0.0	0.0
2.64000E-03	0.0	0.0	0.0		
	59	0.0	5.93700E-02	6.08500E-02	4.55800E-02
0.0	4.42800E-02	4.72000E-02	4.70400E-02	0.0	0.0
4.67800E-02	0.0	0.0	0.0		
	63	0.0	2.09611E-02	2.34100E-02	2.53100E-02
0.0	2.04300E-02	2.23300E-02	2.36800E-02	0.0	0.0
2.41900E-02	0.0	0.0	0.0		
	66	0.0	1.06700E-02	1.36900E-02	1.61000E-02
0.0	1.23900E-02	1.36900E-02	1.52400E-02	0.0	0.0
1.61500E-02	0.0	0.0	0.0		
	73	0.0	3.20480E-04	5.54000E-03	1.32800E-03
0.0	1.65480E-03	1.48600E-02	2.41750e-03	0.0	0.0
2.20700E-02	0.0	0.0	0.0		
	75	1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0		

036

7 27 16

005+009+010+011-018+019

008+012-013+014+015+016+017-020+021

010+212-213+214+215-216+022+5231150-220+221

009+212-213+214+215-216+222-5248850+025

003-046-047+048

002-049+050

001+051

002-052+053

002-057+058

002-059+060

005+063+5644700-066+067

005+063+5655300-066+067

002-063+061

002-073+074

001+075

006+082+083+084+085+086+087

999

Referências Bibliográficas

- /1/ WAUGH R. C. *The Reaction and Growth of Uranium Dioxide-Aluminium Fuel Plates and Compacts*, Oak Ridge, Tenn, Oak Ridge National Laboratory, 1959.(ORNL-2701).
- /2/ TISSIER, A. *CERCA: Working Towards Better LEU Fuel Production*, Nuclear Engineering International 36 (449): 50-1, 1991.
- /3/ NAZARÉ S. *Low Enrichment Dispersion Fuel For Research and Test Reactors*, J. Nucl. Mater., vol. 121, 14-24 p., 1984.
- /4/ SNELGROVE J. L. *Qualification Status Of LEU Fuel*, In: ARGONNE NATIONAL LABORATORY. *Reduced Enrichment For Research Reactor: International Meeting on* Held in Buenos Aires, Argentina, Sep. 28, Oct. 1, 1-18p., 1987.
- /5/ SIMÕES A. V. *Desempenho Sob Irradiação de Combustíveis a Dispersão de MTR*, Dissertação de Mestrado., São Paulo: IPEN-USP., 1993.
- /6/ OLIVEIRA F. B. V. *Desenvolvimento De Um Combustível De Alta Densidade A Base Da Liga Urânio -Molibdênio Com Alta Compatibilidade Em Altas Temperaturas*, São Paulo: IPEN-USP, Tese de Doutorado, 328 p., 2008.
- /7/ DURAZZO, M. et al. *Fabrication of Powder from Ductile U-Mo Alloys for Use as Nuclear Dispersion*. Materials Science Forum (Online), v. 727-728, p. 362-367,

2012.

/8/ LOPES D.A. et al. *PROCESSING WINDOW DESIGN FOR U ALLOYS*, European Research Reactor - RRFM, Prague, 18 - 22 March, pp. 46-51 (2012).

/9/ Cross Section Plotter. Disponível em: <<http://atom.kaeri.re.kr>>, Acessado em: 2015.

/10/ ALMEIDA C. T. S. *Desempenho Sob Irradiação De Elementos Combustíveis Do Tipo U-Mo*, São Paulo: IPEN-USP, Dissertação de Mestrado, 195 p., 2005.

/11/ RYU H. J. et al. *Interdiffusion In The Si-Rich Layer Of U-Mo/Al-Si Fuel*, In 32nd International Meeting On Reduced Enrichment For Research And Test Reactors, Lisbon, Portugal, October 14-20, 2010.

/12/ RYU H, J. et al. *The Effect Of Si-Rich Layer Coating On U-Mo Vs. Al Interdiffusion.*, Nuclear Engineering And Technology, vol. 43, 8 p., 2011.

/13/ GLAGOLENKO I. et al. *Technical Report Irradiation Testing Of The RERTR Fuel Miniplates With Burnable Absorbers In The Advanced Test Reactor*, Idaho National Laboratory (INL), 2010.

/14/ Storr G. J. *Australia's new Research Reactor - OPAL*, IGORR, Beijing, China, 2009.

/15/ The Jules Horowitz Reactor (JHR). *General Description*. Disponível em: <<http://www-cadarache.cea.fr/rjh/general-description.html>>. Acessado em: 12 January 2015.

/16/ Barhein J, Rhotenstein W. and Taviv E. *The HAMMER Code System Technion*, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, NP-565, 1978.

-
- /17/ 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.
- /18/ England T. R., Wilson W. B. and Stamatelato. *Fission Product Data for Thermal Reactors Part 2: Users Manual for EPRI-CINDER Code and Data*, Los Alamos Scientific Laboratory of The University of California, Los Alamos, New Mexico, December, 1976.
- /19/ ANTUNES A. *Um Estudo da Física de Sistemas Multiplicativos Subcríticos Acionados por Fontes e a Utilização de Códigos Determinísticos no Cálculo Destes Sistemas*, São Paulo: IPEN-USP, Dissertação de Mestrado, 106 p., 2008.
- /20/ Fowler T. B., Vondy D. R., Cunningham G. W. *Nuclear Reactor Core Analysis Code: Citation*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, Rev. 2, July 1971. ORNL-TM- 2496.
- /21/ Leppänen J. *Serpent - A Continuous - Energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code - User`s Manual*, March 6, 2013. Disponível em: <<http://montecarlo.vtt.fi/>>, Acessado em: 03/2015.
- /22/ X-5 Monte Carlo Team. *MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 Volume II: User`s Guide*, version 1.60, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, April 24, 2003.
- /23/ RYU H. J., KIM Y. S., PARK J. M., CHAE H. T. and KIM C. K. *Performance Evaluation Of U-Mo/Al Dispersion Fuel By Considering A Fuel-Matrix Interaction*, Nuclear Engineering and Technology, vol. 40, 409-418 p., 2008.
- /24/ Olivares L., Marin J., Barrera. M., Gutierrez C., and Lisboa, J. *Dispersion Fuel Miniplates Based on Umo Powder Produced by Centrifugal Atomization*, RERTR,

Warsaw, Poland, October 14-17, 2012.

/25/ Champion G., Allenou J., Pasturel M. and Tougait O. *A New Method of Producing U(Mo) Particles for Material Testing Reactors (MTR)*, RRFM, Czech Republic, Prague, March 18-22, 2012.

/26/ Lamarsh J. R. *Introduction to Nuclear Engineering*, Polytechnic Institute of New York, 2nd Edition, 1983.

/27/ Santos A. dos. et al. *Isothermal Experiment Of The IPEN/MB-01 Reactor - Experimental Determination Of The Effective Delayed Neutron Parameters and Reactivities Of The IPEN/MB-01 Reactor*, NEA/NSC/DOC/(2006)1, Light Water Moderated Reactor - LWR. IPEN(MB01)-LWR-RESR-001-CRIT-COEF-KIN.