Douglas Borges Domingos

Cálculos Neutrônicos, Termo-hidráulicos e de Segurança de um Dispositivo para Irradiação de Miniplacas (DIM) de Elementos Combustíveis Tipo Dispersão

Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas
e Nucleares como parte dos requisitos para a obtenção do
Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear
- Reatores.

Orientador: Dr. Antonio Teixeira e Silva

São Paulo

2010

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

Agradecimentos

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

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

À minha namorada, Raquel, pelo amor e apoio nos momentos mais difíceis dessa caminhada e pela sua valiosa dedicação.

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

Aos pesquisadores MSc. José Eduardo Rosa da Silva, MSc. Mitsuo Yamaguchi, MSc. Pedro Ernesto Umbehaun e Dr. Thadeu Conti das Neves pelo apoio técnico dado.

Aos amigos Cleiton Pertence da Silva, Thiago Rodrigues Oliveira, Cássio Santana, Rafael Oliveira Rondon Muniz, Pedro Carlos Russo Rossi e Thiago Carluccio pela amizade e apoio.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro para a execução deste trabalho, sob o projeto nº: 2008/55686-6.

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

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

“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes.”

Sir Isaac Newton

*“Nenhum homem realmente produtivo pensa como se estivesse escrevendo uma
dissertação.”*

Albert Einstein

“Nenhum cientista pensa com fórmulas.”

Albert Einstein

Resumo

Neste trabalho foram desenvolvidos cálculos neutrônicos, termo-hidráulicos e de segurança para avaliar a segurança operacional de um dispositivo de irradiação a ser colocado no núcleo do reator IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP. Este dispositivo de irradiação é utilizado para alojar miniplacas de combustível do tipo dispersão de $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ e $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$, com 19,75% em peso de ^{235}U e densidades, respectivamente, de até $3,2 \text{ gU/cm}^3$ e $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Estas miniplacas serão irradiadas a queimas acima de 50% do ^{235}U , de forma a qualificar este tipo de dispersão para utilização no Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), em concepção. Para os cálculos neutrônicos, foram utilizados os programas computacionais 2DB e CITATION. O programa FLOW foi utilizado para determinar o fluxo de refrigerante no irradiador, permitindo o cálculo das temperaturas máximas atingidas nas miniplacas de combustível com o programa MTRCR-IEA-R1. Um Acidente de Perda de Refrigerante (APR) foi analisado com os programas computacionais LOSS e TEMPLOCA, permitindo o cálculo das temperaturas nas miniplacas de combustível após o esvaziamento da piscina do reator. Os cálculos demonstraram que a irradiação deverá ocorrer sem consequências adversas no núcleo de reator IEA-R1.

Abstract

Neutronic, thermal-hydraulics and accident analysis calculations were developed to estimate the safety of a Miniplate Irradiation Device (MID) to be placed in the IEA-R1 reactor core. The irradiation device is used to receive miniplates of $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ and $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ dispersion fuels, LEU type (19.75 % ^{235}U) with uranium densities of, respectively, 3.2 gU/cm³ and 4.8 gU/cm³. The fuel miniplates will be irradiated to nominal ^{235}U burnup levels of 50% and 80%, in order to qualify the above high-density dispersion fuels to be used in the Brazilian Multipurpose Reactor (RMB), now in the conception phase. For the neutronic calculation, the computer codes CITATION and 2DB were utilized. The computer code FLOW was used to calculate the coolant flow rate in the irradiation device, allowing the determination of the fuel miniplate temperatures with the computer model MTRCR-IEA-R1. A postulated Loss of Coolant Accident (LOCA) was analyzed with the computer codes LOSS and TEMPLOCA, allowing the calculation of the fuel miniplate temperatures after the reactor pool draining. The calculations showed that the irradiation should occur without adverse consequences in the IEA-R1 reactor.

Lista de Figuras

3.1	Representação esquemática do núcleo do reator IEA-R1.	24
3.2	Configuração 236 utilizada nos cálculos efetivados no reator.	25
3.3	Dispositivo para Irradiação de Miniplacas - DIM.	28
3.4	Seção transversal do estojo do DIM (dimensões em mm).	29
3.5	Vista geral do SMEMC.	30
3.6	Sensores LVDT utilizados no SMEMC.	31
3.7	Esquema de medição do SMEMC.	32
3.8	Esquema da montagem do SMEMC.	32
3.9	Pontos pré-determinados para medição na miniplaca com o SMEMC. . . .	35
3.10	Média das medidas na piscina do reator e o desvio padrão.	38
4.1	Temperaturas obtidas nas miniplacas do DIM em função da variação de vazão no mesmo. Posição 26.	75
4.2	Temperaturas obtidas nas miniplacas do DIM em função da variação de vazão no mesmo. Posição 36.	75
4.3	Temperaturas obtidas nas miniplacas do DIM em função da variação de vazão no mesmo. Posição 37.	76
4.4	Variação dos critérios de projeto termo-hidráulicos em função da variação de vazão no DIM. Posição 26.	76
4.5	Variação dos critérios de projeto termo-hidráulicos em função da variação de vazão no DIM. Posição 36.	77
4.6	Variação dos critérios de projeto termo-hidráulicos em função da variação de vazão no DIM. Posição 37.	77

4.7	Temperatura para início de ONB. Posição 26.	78
4.8	Temperatura para início de ONB. Posição 36.	78
4.9	Temperatura para início de ONB. Posição 37.	79
4.10	Temperatura nas miniplacas para diferentes espessuras do canal e para uma largura de 3.7 mm do canal de refrigeração.	80
4.11	Variação da velocidade do fluido refrigerante em função da espessura do canal.	81
4.12	Tempo de esvaziamento da piscina do reator devido à Ruptura dos Tubos do Sistema Pneumático de Irradiação (SPI).	91
4.13	Tempo de esvaziamento da piscina do reator devido à Falha nos Drenos da Piscina - Ruptura dos Tubos de Acesso SRA.	92
4.14	Tempo de esvaziamento da piscina do reator devido à Ruptura da Fronteira do Circuito Primário do IEA-R1.	94
4.15	Tempo de esvaziamento da piscina do reator devido à Abertura Indevida dos Drenos do SRA.	95
4.16	Tempo de esvaziamento da piscina do reator devido à Falha nos Tubos Colimadores (BH-3).	97
4.17	Temperaturas das miniplacas após descobrimento do núcleo.	102
4.18	Tempo de irradiação para qualificação das miniplacas na posição 36 para o regime operacional de 120 horas (50% de queima do U^{235}).	103
4.19	Tempo de irradiação para qualificação das miniplacas na posição 36 para o regime operacional de 120 horas (80% de queima do U^{235}).	103
4.20	Tempo de irradiação para qualificação das miniplacas na posição 36 para o regime operacional de 60 horas (50% de queima do U^{235}).	104
4.21	Tempo de irradiação para qualificação das miniplacas na posição 36 para o regime operacional de 60 horas (80% de queima do U^{235}).	104

Lista de Tabelas

3.1	Principais características das miniplacas fabricadas pelo CCN.	26
3.2	Resultados obtidos das medidas de espessura da miniplaca “dummy” realizadas fora da piscina do reator.	33
3.3	Resultados das medidas de espessura da miniplaca “dummy” obtidos da primeira medida realizada dentro da piscina do reator.	36
3.4	Resultados das medidas de espessura da miniplaca “dummy” obtidos da segunda medida realizada dentro da piscina reator.	36
3.5	Resultados das medidas de espessura da miniplaca “dummy” obtidos da terceira medida realizada dentro da piscina do reator.	37
3.6	Resultados das medidas de espessura da miniplaca “dummy” obtidos da quarta medida realizada dentro da piscina após desmontagem e remontagem do SMMC na PECL.	37
3.7	Resultados das medidas de espessura da miniplaca “dummy” obtidos da quinta medida realizada dentro da piscina após desmontagem e remontagem do SMMC na PECL.	38
4.1	Parâmetros de difusão gerados com o 2DB.	46
4.2	Variação do k-efetivo no núcleo devido à inserção do DIM nas posições de irradiação (26, 36 e 37).	55
4.3	Parâmetros neutrônicos gerados com o CITATION (Posição 26).	55
4.4	Parâmetros neutrônicos gerados com o CITATION (Posição 36).	58
4.5	Parâmetros neutrônicos gerados com o CITATION (Posição 37).	61
4.6	Densidade de Potência (W/cm^3) - U_3Si_2 - 4,8 gU/cm^3 . Posição 26.	72

4.7	Densidade de Potência (W/cm^3) - U_3Si_2 - $4,8\ gU/cm^3$. Posição 36.	72
4.8	Densidade de Potência (W/cm^3) - U_3Si_2 - $4,8\ gU/cm^3$. Posição 37.	73
4.9	Variáveis de entrada para os cálculos térmicos e termo-hidráulicos com o programa MTRCR-IEA-R1.	73
4.10	Dados geométricos do DIM.	74
4.11	Distribuição de vazão no núcleo do reator IEA-R1 sem o DIM.	82
4.12	Distribuição de vazão no núcleo do reator IEA-R1 com o DIM inserido em uma das posições de irradiação.	83
4.13	Relação dos dados de entrada do programa LOSS.	86
4.14	Relação dos dados de entrada do programa LOSS para o caso de Ruptura dos Tubos do Sistema Pneumático de Irradiação (SPI).	90
4.15	Relação dos dados de entrada do programa LOSS para o caso de Falha nos Drenos da Piscina - Ruptura dos Tubos de Acesso SRA.	92
4.16	Relação dos dados de entrada do programa LOSS para o caso de Ruptura da Fronteira do Circuito Primário do IEA-R1.	93
4.17	Relação dos dados de entrada do programa LOSS para o caso de Abertura Indevida dos Drenos do SRA.	95
4.18	Relação dos dados de entrada do programa LOSS para o caso de Falha nos Tubos Colimadores (BH-3).	96
4.19	Relação dos dados de entrada do programa TEMPLOCA.	99
4.20	Dados de entrada para o cálculo de temperatura das miniplacas com o TEMPLOCA.	101

Sumário

1. Introdução	14
2. Revisão Bibliográfica	16
3. Miniplacas Combustíveis, Dispositivo para Irradiação de Miniplacas (DIM) e Sistema Medidor de Espessura de Miniplacas Combustíveis (SMEMC)	23
3.1 Reator IEA-R1	23
3.2 Miniplacas Combustíveis de U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al	26
3.3 Dispositivo para Irradiação de Miniplacas (DIM)	28
3.4 Sistema Medidor de Espessura de Miniplacas Combustíveis (SMEMC)	29
3.5 Comissionamento do SMEMC	31
4. Análise Neutrônica, Termo-Hidráulica e de Segurança Para Avaliar a Inserção do DIM na Placa Matriz do Reator IEA-R1	39
4.1 Análise Neutrônica do DIM	39
4.1.1 Programas Computacionais CITATION e 2DB	39
4.2 Análise Termo-Hidráulica do DIM	63
4.2.1 Vazão em Núcleos de Reatores de Pesquisa	64
4.2.2 Critérios de Projeto para Combustíveis MTR Sob Condições de Operação Normal	66
4.2.3 Programa Computacional MTRCR-IEA-R1	70
4.2.4 Aumento da Eficiência de Transferência de Calor do DIM	79
4.2.5 Programa FLOW	81

4.3	Análise de Segurança do DIM	83
4.3.1	Metodologia de Análise dos APR	84
4.4	LOSS	84
4.4.1	Análise de APR no Reator de Pesquisas IEA-R1	88
4.4.2	Ruptura dos Tubos do Sistema Pneumático de Irradiação (SPI)	89
4.4.3	Falha nos Drenos da Piscina - Ruptura dos Tubos de Acesso SRA	90
4.4.4	Ruptura da Fronteira do Circuito Primário do IEA-R1	91
4.4.5	Abertura Indevida dos Drenos do SRA	93
4.4.6	Falha nos Tubos Colimadores (BH-3)	95
4.4.7	TEMPLOCA	96
4.4.8	Temperatura nas Miniplacas Após um APR	100
4.5	Tempo de Irradiação Para a Qualificação das Miniplacas	102
5.	Conclusões	105
A.	Programa 2DB	107
A.1	INPUT	107
B.	Programa CITATION	124
B.1	INPUT - Posição 36	124
C.	Programa MTRCR-IEA-R1	145
C.1	INPUT - Posição 36	145
D.	Programa FLOW	152
D.1	INPUT	152
E.	Programa LOSS	154
E.1	Programa Fonte	154
E.1.1	Dados de Entrada	159
F.	Programa TEMPLOCA	162
F.1	Programa Fonte	162
F.1.1	Dados de Entrada	164

<i>Referências</i>	166
------------------------------	-----

Capítulo 1

Introdução

Para qualificar elementos combustíveis tipo dispersão fabricados no IPEN-CNEN/SP de $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ com densidades de até $3,2 \text{ gU/cm}^3$, bem como elementos combustíveis de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ com densidades de até $4,8 \text{ gU/cm}^3$, foi projetado e construído no IPEN um Dispositivo para Irradiação de Miniplacas (DIM), que permite irradiar simultaneamente até dez miniplacas dos combustíveis acima. Para avaliar o desempenho sob irradiação das miniplacas irradiadas, um conjunto de testes não destrutivos será realizado periodicamente na Piscina de Estocagem dos Combustíveis Irrradiados (PECI) do Reator IEA-R1. Estes testes consistirão da inspeção visual e da medida da espessura das miniplacas ao longo da irradiação. A medida da espessura será realizada pelo Sistema Medidor de Espessura de Miniplacas Combustíveis (SMEMC), desenvolvido no IPEN, para avaliar o inchamento do combustível, através de medições periódicas da espessura das miniplacas ao longo da irradiação.

A introdução de qualquer dispositivo de irradiação no núcleo do reator deve ser devidamente analisada, de forma a avaliar o seu impacto na reatividade e no resfriamento do núcleo, garantindo assim a sua colocação sem o comprometimento da segurança operacional do reator.

O objetivo desta dissertação de mestrado é avaliar, através de análises neutrônicas, termo-hidráulicas e de segurança o impacto da inserção do DIM no núcleo do reator IEA-R1. Após esta análise e da definição da melhor posição de irradiação no núcleo, as miniplacas serão irradiadas.

No cálculo neutrônico foram utilizados os programas computacionais CITATION e

2DB. O programa CITATION modela o núcleo do reator para determinar o k -efetivo, o fluxo de nêutrons, a densidade de potência. O programa 2DB é utilizado para o cálculo do histórico de potência do reator em duas dimensões. As curvas de densidades de potência radial e axial obtidas no cálculo neutrônico foram utilizadas como dados de entrada para a análise termo-hidráulica do DIM. Nesta análise, o modelo termo-hidráulico MTRCR-IEA-R1 foi utilizado para determinar a vazão mínima necessária para refrigerar as miniplacas e para atender aos critérios de segurança das mesmas. O programa FLOW foi utilizado para avaliar se o fluxo de refrigerante desviado do núcleo do reator para a refrigeração das miniplacas irá comprometer o resfriamento do mesmo. A análise de segurança do DIM foi feita considerando a condição hipotética da ocorrência de um Acidente de Perda de Refrigerante Primário - APRP (Loss of Coolant Accident - LOCA) no núcleo do reator. Dois programas computacionais foram utilizados: o programa LOSS e o programa TEMPLOCA. O programa LOSS calcula o tempo de esvaziamento da piscina do reator para diversos eventos postulados de perda de refrigerante. O programa TEMPLOCA calcula a máxima temperatura atingida no combustível, devido ao calor de decaimento dos produtos de fissão e quando da perda completa do fluido de refrigeração no núcleo.

O capítulo 2 desta dissertação apresenta o levantamento bibliográfico relativo à qualificação de elementos combustíveis em reatores de pesquisa, sintetizando os aspectos mais relevantes do programa de qualificação do IPEN-CNEN/SP. No capítulo 3, são apresentados e detalhados os equipamentos utilizados e qualificados neste trabalho. No capítulo 4, são desenvolvidas as análises neutrônica, termo-hidráulica e de segurança do DIM e apresentados os resultados obtidos. As conclusões são apresentadas no capítulo 5.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Em meados dos anos cinquenta, com as restrições impostas ao comércio e utilização de combustíveis com urânio altamente enriquecido (93% em peso de ^{235}U - “High Enriched Uranium” - HEU), a “Atomic Energy Commission” dos Estados Unidos da América (EUA) requisitou ao “Oak Ridge National Laboratory” (ORNL) a construção de um reator tipo piscina, utilizando elementos combustíveis do tipo placa com baixo enriquecimento em urânio ($< 20\%$ 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 do tipo liga de U-Al com alto enriquecimento [1]. Sendo assim, o ORNL optou simplesmente por aumentar por um fator de cinco a quantidade de urânio em cada placa (conservando as demais variáveis de projeto). Desta forma, foi garantida que a reatividade do núcleo do reator não se alteraria substancialmente devido à redução do enriquecimento [2].

As ligas de U-Al de alto enriquecimento que vinham sendo utilizadas em combustíveis do tipo MTR (“Material Test Reactor”) 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.

Para contornar o 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 ,

o U_3Si e o U_6Fe apresentaram-se como os mais promissores a possíveis utilizações. O U_3Si_2 tornou-se o mais viável, devido a sua massa específica elevada, pois o U_3Si e o U_6Fe não se mostraram adequados para combustíveis tipo placa [3].

Além de novos materiais, novas técnicas de fabricação tiveram que ser desenvolvidas, surgindo os combustíveis a dispersão, fabricados pela técnica da metalurgia do pó [4] uma vez que era impossível combinar os novos materiais em uma liga. Nesta técnica, quantidades conhecidas de pó combustível e de pó alumínio são misturadas até se obter um conjunto homogêneo. Este conjunto é posteriormente prensado e colocado em um forno de desgaseificação (aquecido entre 550°C e 590°C), formando um compactado que é então envolvido lateralmente por uma moldura de liga de alumínio. A moldura e o compactado são cobertos em suas faces por placas de liga de alumínio, formando uma espécie de “sanduíche”. Este conjunto é então laminado a quente, sendo o último passo de laminação dado a frio, para atingir as dimensões e resistência mecânica necessárias à placa. Em consequência deste processo, o que se obtém é um placa combustível em que o cerne é composto por uma dispersão de material físsil e alumínio. Através desta técnica de fabricação, podem ser obtidas, além de uma distribuição homogênea da fase físsil dispersa, concentrações que não comprometam as etapas de fabricação subsequentes. Entretanto, para garantir a integridade mecânica das placas, a concentração em volume da fase dispersa é limitada em 45% [4].

No final dos anos setenta, um grupo de trabalho selecionado pela “International Atomic Energy Agency” (IAEA) dentro da estrutura do “International Nuclear Fuel Cycle Evaluation” (INFCE) começou a investigar a possibilidade da utilização da energia nuclear para fins pacíficos com simultânea minimização do risco de proliferação de armas nucleares. A partir destas investigações, concluiu-se que o risco de proliferação de armas poderia ser reduzido com a conversão dos núcleos de MTR de HEU para LEU [5]. Sendo assim, países detentores da tecnologia nuclear (em particular, Estados Unidos, Canadá, Alemanha, França, Brasil e Argentina) iniciaram dentro do programa “Reduced Enrichment for Research and Test Reactors” (RERTR) o desenvolvimento de combustíveis com baixo enriquecimento em ^{235}U com o intuito de realizar posteriormente a conversão de seus reatores. Um dos objetivos principais do programa RERTR era demonstrar que os combustíveis já qualificados com alto desempenho ($\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ e $\text{UAl}_x\text{-Al}$) poderiam também o

ser com baixo enriquecimento e, conseqüentemente, com maiores concentrações de urânio. Outro objetivo seria desenvolver e qualificar novos combustíveis com maiores massas específicas de urânio (U_3Si_2) evitando, quando possível, alterações no projeto do reator e nos processos de fabricação normalmente utilizados. Reuniões internacionais realizadas periodicamente entre vários especialistas e colaboradores participantes desse programa demonstraram através de inúmeros trabalhos que as dispersões com baixo enriquecimento em ^{235}U poderiam ser utilizadas sem problemas nos vários reatores de pesquisa e teste de materiais em todo o mundo [6]. Em 1987, no RERTR 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 até $2,3 \text{ gU/cm}^3$ (45% em volume da fase UAl_x), $3,2 \text{ gU/cm}^3$ (45% em volume da fase U_3O_8) e $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (42,5% em volume da fase U_3Si_2), devido ao bom desempenho apresentado pelas mesmas nos testes realizados [7].

Os testes de irradiação de protótipos de novos combustíveis em reatores de pesquisa devem demonstrar que estes combustíveis tem comportamento aceitável frente aos requisitos de projetos e de segurança especificados. Normalmente, para comprovar o bom desempenho de um combustível sob irradiação, pelo menos dois protótipos desse combustível são irradiados. O primeiro deve ser irradiado até se atingir a queima média final estipulada para um elemento combustível inteiro ($\sim 50\%$ de queima do ^{235}U). O segundo deve ser irradiado até queimas mais elevadas para demonstrar as margens de segurança definidas. Após a irradiação, uma série de exames pós-irradiação (“Post Irradiation Examination” - PIE) devem ser conduzidos para fornecer informações sobre os seguintes itens [8]:

- deformações geométricas do elemento combustível (EC) (tais como torção ou empenamento);
- inchamento (“swelling”) do combustível;
- microestrutura das partículas de combustível irradiadas (por exemplo, bolhas formadas por produtos de fissão gasosos);
- temperatura limiar para empolamento;
- integridade do revestimento (por exemplo, ausência de liberação de produtos de fissão); e

- corrosão do revestimento.

A temperatura de empolamento é definida como a temperatura onde ocorre um grande inchamento da placa combustível devido à expansão dos gases ou produtos de fissão nela contido, com a consequente obstrução do canal de refrigeração e posterior elevação da temperatura da placa até a sua fusão.

Os relatório finais sobre as condições de irradiação e resultados das análises pós-irradiação devem incluir:

- condições de irradiação baseadas em medidas ou cálculos;
- histórico de potência do reator;
- histórico de temperatura do fluido refrigerante;
- histórico de potência do conjunto de elementos combustíveis, que compõem o núcleo do reator;
- histórico do EC testado;
- histórico de fluxo de calor no EC testado;
- discussão de qualquer problema ou anomalia observada; e
- resultados da análise pós-irradiação.

O IPEN-CNEN-SP desenvolveu nos últimos anos a fabricação de combustíveis a dispersão de $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ e $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$. O combustível de $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ fabricado no IPEN encontra-se qualificado até uma densidade de $2,3 \text{ gU/cm}^3$ (33% em volume) e o de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ até uma densidade de $3,0 \text{ gU/cm}^3$ (26% em volume) [9]. O núcleo do reator IEA-R1 é hoje totalmente composto por combustíveis dos tipos acima com baixo enriquecimento em ^{235}U , e pode operar a uma potência de até 5 MW.

Os elementos combustíveis a dispersão de $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ e de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ fabricados no IPEN seguem rigorosas especificações técnicas, que foram definidas após cuidadosas revisões bibliográficas abrangendo a experiência mundial no projeto, fabricação e análise do desempenho sob irradiação de combustíveis a dispersão. Entretanto, como visto anteriormente, a garantia de um bom desempenho sob irradiação só pode ser confirmada através de minuciosos

exames pós-irradiação. No Brasil, não existem reatores de alto fluxo neutrônico onde se possa irradiar miniplacas combustíveis e atingir queimas elevadas em tempos de irradiação curtos, nas quais os danos no combustível apareçam em maior escala. Também, não existem células quentes em que os danos no combustível possam ser examinados através de testes destrutivos.

A qualificação dos elementos combustíveis fabricados no IPEN foi feita diretamente no reator IEA-R1, através de um programa de acompanhamento da irradiação [10]. Neste programa, o EC foi colocado diretamente no reator IEA-R1 e técnicas de análise não destrutivas foram aplicadas para a sua qualificação. Esta qualificação foi efetuada em dois passos:

1. Monitoramento do comportamento sob irradiação do EC durante a operação do reator IEA-R1 através dos seguintes parâmetros: potência do reator, tempo de operação, fluxo neutrônico na posição de cada EC, queima, temperatura de entrada e saída da água de resfriamento do reator, pH da água, condutividade da água, quantidade de cloro e análise radioquímica da água do reator;
2. Inspeção visual periódica dos elementos combustíveis com câmera subaquática para verificar a sua integridade e condições superficiais e teste de “sipping” no caso de suspeita de falha de algum EC. O teste de “sipping” é uma técnica não destrutiva aplicada para avaliar a integridade física do revestimento de combustíveis irradiados, a qual é baseada na utilização de espectrometria gama para detectar a presença de produtos de fissão radioativos no fluido refrigerante.

A utilização destas técnicas não destrutivas permitiu avaliar parcialmente alguns dos itens importantes proposto pela análise pós-irradiação (PIE). Através da inspeção visual do EC é possível verificar problemas de torção ou empenamento e aspectos da corrosão apresentada pelas placas combustíveis externas. A integridade do revestimento pode ser atestada pela ausência de produtos de fissão na água do reator. Entretanto, itens como inchamento do combustível e microestrutura das partículas combustíveis não podem ser avaliados.

Até o momento, não houve nenhum tipo de falha de EC nesta qualificação e os combustíveis de U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al, com densidades, respectivamente, de até 2,3 gU/cm³ e

até 3,0 gU/cm³ estão qualificados, uma vez que vários dos EC acompanhados atingiram queimas superiores a 40% e já foram retirados definitivamente do núcleo do reator IEA-R1.

Entretanto, permanecia no IPEN o interesse em fabricar combustíveis com densidades mais elevadas de forma a atingir as densidades máximas qualificadas no mundo, ou seja, 3,2 gU/cm³ e 4,8 gU/cm³, respectivamente, para os combustíveis U₃O₈-Al e U₃Si₂-Al. Este interesse foi reforçado com a previsão da construção no Brasil do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) que deve operar com potências acima de 20 MW, necessitando de combustíveis com densidades de urânio mais elevadas. Havia, porém o receio de se colocar para irradiação no Reator IEA-R1 combustíveis completos nas densidades máximas qualificadas no mundo, sem antes desenvolver testes através de irradiações de miniplacas.

No ano de 2007, houve a substituição do trocador de calor do Reator IEA-R1, o que possibilitou a sua operação com segurança até uma potência de 5 MW. Nesta potência, é possível atingir queimas mais elevadas do combustível em tempos relativamente mais curtos. Assim, foi proposto colocar no reator IEA-R1 miniplacas dos combustíveis fabricadas no IPEN do tipo dispersão de U₃O₈-Al e U₃Si₂-Al nas densidades máximas qualificadas no mundo e acompanhar o seu desempenho sob irradiação utilizando as técnicas de análise não destrutivas descritas anteriormente. No caso de um bom desempenho sob irradiação das miniplacas irradiadas, poderia ser construído, posteriormente, elementos combustíveis completos nas densidades máximas qualificadas no mundo para irradiação no Reator IEA-R1. O bom desempenho destes combustíveis teria sido atestado pela irradiação das miniplacas até queimas superiores a 80% em ²³⁵U.

Também, para um acompanhamento com maior segurança das miniplacas sob irradiação, foi proposto o desenvolvimento de um Sistema Medidor de Espessuras de Miniplacas Combustíveis (SMEMC) [11]. Este sistema tem como objetivo realizar medições periódicas da espessura das miniplacas combustíveis para acompanhar o inchamento do combustível sob irradiação. Esta medida forneceria uma segurança adicional na qualificação, uma vez que um possível fechamento dos canais de refrigeração das miniplacas estaria sendo monitorado através das medições de espessura ao longo da irradiação.

Então, para realizar a irradiação e qualificação de combustíveis tipo dispersão a densidades elevadas no reator IEA-R1, foi projetado um Dispositivo para Irradiação de Miniplacas (DIM), que possui dimensões externas próximas ao elemento combustível padrão do

reator IEA-R1 [12]. No interior do DIM será inserido um estojo que permite a colocação de até dez miniplacas combustíveis de U_3O_8-Al e/ou U_3Si_2-Al . Para acompanhar o desempenho sob irradiação das miniplacas, um conjunto de testes não destrutivos será realizado periodicamente na PEI do reator. Estes testes consistirão na inspeção visual das miniplacas irradiadas e na medida da espessura das miniplacas para verificar o inchamento do combustível ao longo da irradiação.

A medida de espessura será realizada com o SMEMC, por meio de medições periódicas da espessura das miniplacas durante o tempo de irradiação. Caso seja constatado aumento na atividade da água da piscina do reator, serão realizados testes de “sipping” nas miniplacas irradiadas para verificar a ocorrência de falhas no revestimento das mesmas.

Capítulo 3

Miniplacas Combustíveis, Dispositivo para Irradiação de Miniplacas (DIM) e Sistema Medidor de Espessura de Miniplacas Combustíveis (SMEMC)

3.1 Reator IEA-R1

O reator IEA-R1 é um reator de pesquisa do tipo piscina aberta e tem como refrigerante e moderador água leve desmineralizada e berílio e grafite como refletores. O núcleo tem a forma de um paralelepípedo. Ele é formado por 25 elementos, sendo 20 EC padrão, 4 elementos combustíveis de controle de controle (ECT), 1 elemento irradiador de berílio, elementos para irradiação de amostras (irradiadores) e refletores, sendo que o número de irradiadores e refletores na placa matriz do mesmo varia de acordo com a configuração escolhida.

O EC padrão possui as seguintes dimensões: 87,3 *cm* de altura, incluindo o bocal que possui 15,86 *cm*, 7,976 *cm* de comprimento e 7,61 *cm* de largura. Este elemento possui 18 placas combustíveis, sendo que cada placa possui 62,5 *cm* de altura, 0,152 *cm* de espessura e 6,71 *cm* de largura. A parte ativa da placa possui 60,0 *cm* de altura, 6,26 *cm* de largura e 0,152 *cm* de espessura, dos quais 0,072 *cm* correspondem a espessura do cerne combustível e 0,038 *cm* a espessura dos revestimentos de alumínio do mesmo. O ECT possui 12 placas combustíveis. Neste elemento, as posições vazias são utilizadas para movimentar e alojar as barras de controle, que possuem as mesmas dimensões das placas combustíveis (62,5 *cm* de altura, 0,152 *cm* de espessura e 6,71 *cm* de largura). Todos os

elementos são encaixados verticalmente em furos de uma placa matriz e colocados dentro de uma piscina. A refrigeração do núcleo é feita através da circulação forçada de água que se dá no sentido descendente, promovida pela bomba principal. Esta água, após passar pelo núcleo, é resfriada num trocador de calor e re-injetada na parte superior da piscina.

A vazão fornecida pela bomba é dividida nos diversos elementos combustíveis padrão e de controle, nos irradiadores que permitem a passagem de água, nos furos secundários não tamponados da placa matriz, nos canais entre elementos combustíveis e nos canais entre refletores e irradiadores, reunificando-se na região do coletor.

O escoamento pelos canais internos dos EC e dos ECT promove o resfriamento das placas combustíveis internas; o escoamento nos canais entre elementos promove o resfriamento das faces externas das placas combustíveis laterais; o escoamento pelos canais entre refletores e irradiadores tem por finalidade principal permitir que não haja estagnação do fluido refrigerante e o escoamento pelos furos principais e secundários não tamponados não têm finalidade alguma e podem, se não forem tamponados, desviar parte da vazão que deveria estar passando pelos canais ou irradiadores onde há geração de calor.

A Fig. (3.1) apresenta uma representação esquemática do núcleo do reator IEA-R1 contendo 20 EC, 4 ECT, refletores e irradiadores na placa matriz do reator.

Figura 3.1: Representação esquemática do núcleo do reator IEA-R1.

A Fig. (3.2) apresenta a configuração número 236 do núcleo do reator IEA-R1 utilizada em todos os cálculos e modelagens do núcleo desenvolvidas nesta dissertação.

Figura 3.2: Configuração 236 utilizada nos cálculos efetivados no reator.

3.2 Miniplacas Combustíveis de U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al

No ano de 2007, houve a substituição do trocador de calor do Reator IEA-R1, o que possibilitou a sua operação com segurança até uma potência de 5 MW. Nesta potência é possível atingir queimas mais elevadas do combustível em tempos relativamente mais curtos. Assim, foi proposto colocar no núcleo do reator IEA-R1 miniplacas combustíveis do tipo dispersão de U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al nas densidades máximas qualificadas no mundo e acompanhar o seu desempenho sob irradiação.

O programa para qualificação dos combustíveis utilizados no reator IEA-R1 prevê uma primeira irradiação onde serão alojadas miniplacas de U_3Si_2 -Al com densidades de 3,0 gU/cm³ e 4,8 gU/cm³ e miniplacas de U_3O_8 -Al com densidades de 2,3 gU/cm³ e 3,2 gU/cm³. A irradiação das miniplacas combustíveis de U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al com densidades, respectivamente, de 2,3 gU/cm³ e 3,0 gU/cm³ tem simplesmente o objetivo de avaliar o comportamento de combustíveis já qualificados diretamente no núcleo do reator IEA-R1. Entretanto, pela primeira vez será possível avaliar o inchamento sob irradiação do combustível nestas densidades mediante uso do SMEMC. Posteriormente, será possível comparar estes resultados com os dados medidos com o SMEMC para as miniplacas de combustível nas densidades de urânio máximas qualificadas para este tipo de combustível.

A Tab. (3.1) apresenta o conjunto de miniplacas fabricadas pelo Centro do Combustível Nuclear (CCN) e especificadas pelo Centro de Engenharia Nuclear (CEN), dentre as quais serão selecionadas cerca de dez para uma primeira irradiação. As miniplacas identificadas como Si-E-XX e O_x-E-XX são, respectivamente, de U_3Si_2 -Al e U_3O_8 -Al. As miniplacas Si-E-XX foram fabricadas nas densidades de 3,0 gU/cm³ e 4,8 gU/cm³ e as miniplacas O_x-E-XX foram fabricadas nas densidades de 2,3 gU/cm³ e 3,2 gU/cm³.

Tabela 3.1 - Principais características das miniplacas fabricadas pelo CCN.

Identificação	Espessura (mm)	Massa de urânio (g)	Porosidade do núcleo (vol%)
Si-E-01	1,52	10,42	7,65
Si-E-02	1,52	10,40	7,40
Si-E-03	1,52	10,38	8,55
Si-E-04	1,52	10,39	8,48

Continua na próxima página...

Tabela 3.1 - Principais características das miniplacas fabricadas pelo CCN.

Identificação	Espessura (mm)	Massa de urânio (g)	Porosidade do núcleo (vol%)
Si-E-05	1,52	16,13	10,44
Si-E-06	1,52	16,13	12,06
Si-E-07	1,52	16,14	12,03
Si-E-08	1,52	16,14	12,36
Ox-E-01	1,52	7,72	10,85
Ox-E-02	1,52	7,71	11,08
Ox-E-03	1,52	7,73	10,81
Ox-E-04	1,52	7,74	11,33
Ox-E-05	1,52	10,74	14,18
Ox-E-06	1,52	10,75	15,05
Ox-E-07	1,52	10,72	14,73
Ox-E-08	1,52	10,75	14,83
Identificação	Comprimento do cerne (mm)	Largura do cerne (mm)	Densi. nominal de U (gU/cm ³)
Si-E-01	120	42	3,1
Si-E-02	116	42	3,1
Si-E-03	116	42	3,1
Si-E-04	114	42	3,1
Si-E-05	114	42	4,8
Si-E-06	117	42	4,8
Si-E-07	115	42	4,8
Si-E-08	115	42	4,8
Ox-E-01	122	42	2,3
Ox-E-02	116	42	2,3
Ox-E-03	116	42	2,3
Ox-E-04	117	42	2,3
Ox-E-05	123	42	3,2
Ox-E-06	119	42	3,2
Ox-E-07	116	42	3,2
Ox-E-08	118	42	3,2

3.3 Dispositivo para Irradiação de Miniplacas (DIM)

O DIM foi projetado no IPEN-CNEN/SP para atender ao programa de qualificação de combustíveis a dispersão de alta densidade de urânio desenvolvido pelo CEN em parceria com o CCN [12].

A Fig. (3.3) mostra o dispositivo que é composto por um tubo de alumínio, de seção transversal quadrada, que irá conter em seu interior um estojo que possui ranhuras laterais para o alojamento de dez miniplacas combustíveis. As dimensões do dispositivo são semelhantes às de um elemento combustível padrão do reator IEA-R1.

Figura 3.3: Dispositivo para Irradiação de Miniplacas - DIM.

A Fig. (3.4) apresenta a seção transversal do estojo onde serão acopladas as 10 miniplacas. O estojo foi projetado para facilitar a manipulação das miniplacas, visto que estas serão retiradas do núcleo do reator periodicamente para inspeção visual e medida de espessura.

Figura 3.4: Seção transversal do estojo do DIM (dimensões em mm).

3.4 Sistema Medidor de Espessura de Miniplacas Combustíveis (SMEMC)

O SMEMC é um dispositivo baseado em uma estrutura mecânica para o posicionamento e varredura de toda a área superficial das miniplacas. O sistema é fixado na PECEI do reator IEA-R1 e será operado da borda da piscina, permitindo a medição da espessura por meio de dois sensores LVDT (“Linear Variable Differential Transformer”) subaquáticos, montados em posições opostas, um em frente ao outro. Os resultados serão coletados por um leitor eletrônico conectado aos sensores. A medição do deslocamento é efetuada através de uma variação de tensão, resultado da mudança na impedância entre duas ou mais bobinas. Nos sensores LVDT, três enrolamentos simetricamente espaçados e um núcleo magnético móvel formam o sistema de acoplamento magnético. A mudança da posição do núcleo é detectada eletronicamente e processada adequadamente para geração de uma leitura

precisa do deslocamento aplicado [11].

A Fig. (3.5) apresenta uma vista geral do SMEMC montado na borda da piscina do reator IEA-R1, onde foi realizado o seu comissionamento com placas “dummy” [11].

Figura 3.5: Vista geral do SMEMC.

A Fig. (3.6) apresenta os sensores LVDT, que fazem a varredura superficial das miniplacas combustíveis através de nove pontos pré-determinados. Esses pontos são medidos antes da inserção das miniplacas no núcleo do reator e, posteriormente, acompanhados periodicamente para verificar se houve um inchamento expressivo no combustível.

Figura 3.6: Sensores LVDT utilizados no SMEMC.

A Fig. (3.7) apresenta o posicionamento do SMEMC na área de estocagem da piscina do reator IEA-R1. O equipamento é fixado na borda da piscina e sua haste de alumínio fica imersa até uma profundidade de 2 m, onde estão acoplados os sensores LVDT, poucos centímetros acima de uma bandeja na qual o combustível irradiado será manipulado para a medição. O DIM será retirado do núcleo do reator pelos seus operadores e será acoplado a uma base na qual também ficará o estojo contendo as dez miniplacas combustíveis irradiadas. Em seguida, cada miniplaca será levada ao ponto de medição, onde será feita a varredura superficial da mesma pelos sensores LVDT, e logo após as medições a miniplaca será recolocada no estojo. O processo é realizado separadamente para cada uma das dez miniplacas irradiadas. O sistema será operado da borda da piscina por uma mesa mecânica que permite a varredura superficial do combustível nos eixos x e y como mostra a ilustração.

A Fig. (3.8) apresenta o sistema eletrônico de medição do SMEMC. Os sensores LVDT são acionados por ar comprimido fornecido por uma bomba FMS e o deslocamento dos mesmos é medido por uma leitora eletrônica.

3.5 Comissionamento do SMEMC

Para comissionar o sistema e garantir sua precisão sob diferentes condições de operação, dois conjuntos de medidas foram efetuados, respectivamente, dentro e fora da piscina do reator. As medidas foram realizadas com duas miniplacas “dummy” de alumínio de diferentes espessuras. A primeira, com 170 mm de altura, 52 mm de largura e 1,44 mm de espessura, foi utilizada para as medidas fora da piscina e a segunda com 170 mm de

Figura 3.7: Esquema de medição do SMEMC.

Figura 3.8: Esquema da montagem do SMEMC.

altura, 52 *mm* de largura e 1,41 *mm* de espessura foi utilizada para as medidas no interior da piscina de estocagem do reator IEA-R1. Foram realizadas cinco medidas dentro da piscina.

A Tab. (3.2) apresenta as medidas realizadas durante o comissionamento do sistema fora da piscina do reator. Para os testes, foi utilizada a placa “dummy” com 170 *mm* de altura, 52 *mm* de largura e 1,44 *mm* de espessura. Foram feitas cinco medidas com a mesma miniplaca, variando apenas o modelo de leitura da leitora eletrônica para avaliar a precisão do equipamento. O sistema eletrônico possui diferentes modos de leitura dos quais quatro foram selecionados para avaliar a precisão do equipamento. A leitura do deslocamento é efetuada primeiramente sem obstáculo (miniplaca) entre os sensores (A e B) e uma marca é fixada (primeira leitura). Em seguida, coloca-se a miniplaca e novamente os sensores são acionados e uma nova marca é fixada (segunda leitura). A diferença entre as marcas ou a diferença do deslocamento dos sensores com e sem miniplaca é a espessura do ponto medido na superfície do obstáculo. Da Tab. (3.2) pode ser observado que as quatro medidas são extremamente precisas variando apenas 0,002 *mm*, o que garante a precisão do equipamento em diferentes modos de leitura.

Tabela 3.2 - Resultados obtidos das medidas de espessura da miniplaca “dummy” realizadas fora da piscina do reator.

Medida	Modo de medida	1ª leitura A	2ª leitura B	Diferença	Resultado $-A + B$ (μm)
1	$A + B$	-530	910		$-(-530)+910=1440$
2	A	-344	-77	$-344-77=-267$	
				+	$-267+(-1175)=-1442$
	B	-190	985	$-190-985=-1175$	
3	$A - B$	-526	916		$-526+(-916)=-1442$
4	$-A + B$	-531	906		$-(-531)+906=1437$
5	A	-345	-75	$-335-75=-260$	
				+	$-260+(-1182)=-1442$
	B	-193	989	$-193-989=-1182$	

A partir das medidas realizadas fora da piscina, foi adotado por convenção, como modo de leitura padrão $-A + B$ visto que todos os modos de leitura apresentaram resultados aproximadamente iguais. Após os testes realizados fora da piscina do reator, o sistema

foi deslocado para o saguão da piscina do reator IEA-R1 onde foi preparado e em seguida montado à borda da piscina para ser comissionado. Foram realizadas cinco medidas utilizando uma miniplaca “dummy” com 170 *mm* de altura, 52 *mm* de largura e 1,41 *mm* de espessura. Foram pré-determinados nove pontos (X_1 , X_2 , X_3 , Y_1 , Y_2 , Y_3 , Z_1 , Z_2 e Z_3), que estão representados esquematicamente na Fig. (3.9), na superfície da miniplaca “dummy”, para serem medidos pelo sistema durante o período de irradiação. Os pontos estão localizados ao longo da posição do cerne do combustível onde existe a probabilidade de um inchamento mais acentuado. Das cinco medidas realizadas, três foram realizadas em sequência, ou seja, retirando-se apenas a miniplaca entre uma medida e outra. Após o encerramento da terceira medida todo o equipamento foi desmontado e retirado da piscina e, logo em seguida, remontado à borda da mesma para avaliar se os esforços aplicados sobre a estrutura do sistema poderiam modificar as leituras.

As Tabs. (3.3), (3.4) e (3.5) apresentam as três primeiras medidas realizadas na piscina apenas retirando e recolocando a miniplaca entre uma medida e outra. A primeira leitura foi feita sem miniplaca (ponta-a-ponta) entre os sensores e, logo em seguida, a miniplaca foi posicionada e os nove pontos foram medidos. Os resultados foram obtidos através da diferença entre a primeira e a segunda leitura de cada ponto. A variação entre os pontos em uma única medida ocorre em consequência da não uniformidade da superfície da miniplaca na fabricação da mesma. Das três tabelas pode ser observado que a variação entre as medidas obtidas em cada ponto é mínima, não ultrapassando 0,002 *mm*.

As Tabs. (3.6) e (3.7) apresentam as duas últimas medidas realizadas na piscina após a desmontagem e remontagem do equipamento na borda da mesma, para avaliar se os esforços sofridos pela estrutura durante sua desmontagem, deslocamento e remontagem afetariam as medidas subsequentes. Após a remontagem do equipamento, as medidas foram realizadas seguindo os mesmos procedimentos descritos acima e como pode ser observado nas Tabs. (3.6) e (3.7) a variação entre as medidas obtidas em cada ponto é mínima quando comparadas com as outras três medidas realizadas, não ultrapassando 0,002 *mm*.

A Fig. (3.10) apresenta a média das cinco medidas realizadas dentro da piscina em cada ponto determinado e o desvio padrão em torno da média de cada ponto. Como pode ser observado, o desvio padrão em cada ponto não ultrapassa 0,003 *mm*, o que representa uma incerteza de aproximadamente 0,2% na medida de espessura das miniplacas irradiadas.

Figura 3.9: Pontos pré-determinados para medição na miniplaca com o SMEMC.

Tabela 3.3 - Resultados das medidas de espessura da miniplaca “dummy” obtidos da primeira medida realizada dentro da piscina do reator.

Pontos	Modo de medida	1ª leitura (ponta-a-ponta)	2ª leitura	Diferença	Resultado (μm)
X_1	$-A + B$	-266	1144	-266+1144	1410
X_2	$-A + B$	-266	1144	-266+1144	1410
X_3	$-A + B$	-266	1141	-266+1141	1407
Y_1	$-A + B$	-266	1145	-266+1145	1411
Y_2	$-A + B$	-266	1147	-266+1147	1413
Y_3	$-A + B$	-266	1146	-266+1146	1412
Z_1	$-A + B$	-266	1150	-266+1150	1416
Z_2	$-A + B$	-266	1149	-266+1149	1415
Z_3	$-A + B$	-266	1147	-266+1147	1413

Tabela 3.4 - Resultados das medidas de espessura da miniplaca “dummy” obtidos da segunda medida realizada dentro da piscina reator.

Pontos	Modo de medida	1ª leitura (ponta-a-ponta)	2ª leitura	Diferença	Resultado (μm)
X_1	$-A + B$	-266	1145	-266+1145	1411
X_2	$-A + B$	-266	1145	-266+1145	1411
X_3	$-A + B$	-266	1141	-266+1141	1407
Y_1	$-A + B$	-266	1147	-266+1147	1413
Y_2	$-A + B$	-266	1148	-266+1148	1414
Y_3	$-A + B$	-266	1148	-266+1148	1414
Z_1	$-A + B$	-266	1148	-266+1148	1414
Z_2	$-A + B$	-266	1147	-266+1147	1413
Z_3	$-A + B$	-266	1149	-266+1149	1415

Tabela 3.5 - Resultados das medidas de espessura da miniplaca “dummy” obtidos da terceira medida realizada dentro da piscina do reator.

Pontos	Modo de medida	1ª leitura (ponta-a-ponta)	2ª leitura	Diferença	Resultado (μm)
X_1	$-A + B$	-266	1146	-266+1146	1412
X_2	$-A + B$	-266	1144	-266+1144	1410
X_3	$-A + B$	-266	1144	-266+1144	1410
Y_1	$-A + B$	-266	1147	-266+1147	1413
Y_2	$-A + B$	-266	1148	-266+1148	1414
Y_3	$-A + B$	-266	1149	-266+1149	1415
Z_1	$-A + B$	-266	1150	-266+1150	1416
Z_2	$-A + B$	-266	1148	-266+1148	1414
Z_3	$-A + B$	-266	1150	-266+1150	1416

Tabela 3.6 - Resultados das medidas de espessura da miniplaca “dummy” obtidos da quarta medida realizada dentro da piscina após desmontagem e remontagem do SMEMC na PECL.

Pontos	Modo de medida	1ª leitura (ponta-a-ponta)	2ª leitura	Diferença	Resultado (μm)
X_1	$-A + B$	-266	1145	-266+1145	1411
X_2	$-A + B$	-266	1146	-266+1146	1412
X_3	$-A + B$	-266	1145	-266+1145	1411
Y_1	$-A + B$	-266	1148	-266+1148	1414
Y_2	$-A + B$	-266	1148	-266+1148	1414
Y_3	$-A + B$	-266	1148	-266+1148	1414
Z_1	$-A + B$	-266	1151	-266+1151	1417
Z_2	$-A + B$	-266	1151	-266+1151	1417
Z_3	$-A + B$	-266	1152	-266+1152	1418

Tabela 3.7 - Resultados das medidas de espessura da miniplaca “dummy” obtidos da quinta medida realizada dentro da piscina após desmontagem e remontagem do SMEMC na PECL.

Pontos	Modo de medida	1ª leitura (ponta-a-ponta)	2ª leitura	Diferença	Resultado (μm)
X_1	$-A + B$	-266	1148	-266+1148	1414
X_2	$-A + B$	-266	1145	-266+1145	1411
X_3	$-A + B$	-266	1144	-266+1144	1410
Y_1	$-A + B$	-266	1149	-266+1149	1415
Y_2	$-A + B$	-266	1146	-266+1146	1412
Y_3	$-A + B$	-266	1150	-266+1150	1416
Z_1	$-A + B$	-266	1149	-266+1149	1415
Z_2	$-A + B$	-266	1149	-266+1149	1415
Z_3	$-A + B$	-266	1146	-266+1146	1412

Figura 3.10: Média das medidas na piscina do reator e o desvio padrão.

Capítulo 4

Análise Neutrônica, Termo-Hidráulica e de Segurança Para Avaliar a Inserção do DIM na Placa Matriz do Reator IEA-R1

4.1 *Análise Neutrônica do DIM*

A realização de qualquer experimento em um reator nuclear deve ser precedida pela análise do impacto desse experimento no mesmo. A inserção do DIM, com dez mini-placas combustíveis de alta densidade de urânio nas posições de irradiação do núcleo do reator IEA-R1, acarretará mudanças nos parâmetros neutrônicos (k-efetivo, densidade de potência e fluxo de nêutrons) do reator, de forma que essas mudanças podem influenciar diretamente nos parâmetros de operação do reator. Todo o conjunto de materiais que compõem o DIM e o núcleo do reator IEA-R1 foram modelados e estudados utilizando os programas computacionais CITATION [13] e 2DB [14] para verificar as mudanças nos parâmetros neutrônicos do reator IEA-R1 com a introdução do DIM.

4.1.1 *Programas Computacionais CITATION e 2DB*

Teoria da Difusão

Os nêutrons movem-se em um reator em complicados trajetos de ziguezague devido à reações de espalhamento, absorção e fissão com os núcleos dos materiais que compõem o reator. Em consequência dessa movimentação, nêutrons que estavam originalmente em uma parte do reator movendo-se em uma direção particular e com uma energia particular,

aparecem um tempo depois em outra parte do sistema, movendo-se em outra direção com alguma outra energia. Os nêutrons nesse caso foram “transportados” de uma região com uma determinada energia para uma segunda com outra energia, e esse fenômeno pode ser descrito pela equação de transporte de Boltzmann (Eq. (4.1)).

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} + v\hat{\Omega} \cdot \nabla n + v\Sigma_t n(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega}, t) = \\ = \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \int_0^\infty dE' v' \Sigma_s(E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) n(\mathbf{r}, E', \hat{\Omega}', t) + s(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega}, t) \end{aligned} \quad (4.1)$$

onde,

- n é a densidade de nêutrons em n/cm^3 ;
- v é o número de nêutrons produzidos por fissão em função da energia E ;
- $\hat{\Omega}$ é o versor direção em cm ;
- Σ_t é a seção de choque macroscópica total em cm^{-1} ;
- r é a posição em cm ;
- E é a energia do nêutron após a fissão em MeV ;
- t é o tempo em s ;
- $\hat{\Omega}'$ é o versor direção dos nêutrons após as colisões em cm ;
- E' é a energia dos nêutrons após várias colisões em MeV ;
- v' número de nêutrons produzidos por fissão em função da energia E' ;
- Σ_s é a seção de choque macroscópica de espalhamento em cm^{-1} ; e
- s é o número de nêutrons emitidos pela fonte $n/cm^3.s$.

Essa equação pode ser derivada para o transporte de nêutrons em reatores [15], mas é mais simples de se derivar do que de se resolver. Assim, sob certas condições, utiliza-se a equação aproximada da equação de transporte, denominada equação da difusão de

nêutrons. Embora seja uma aproximação da equação de transporte, o uso da equação da difusão fornece resultados suficientemente precisos para a solução exata da equação de transporte e, devido à sua simplicidade, é comumente usada em muitos problemas de projetos de reator [15] [16].

Considere um volume arbitrário V de um material contendo nêutrons monoenergéticos. Com o passar do tempo, alguns desses nêutrons irão interagir com núcleos e serão absorvidos ou espalhados, alguns poderão deixar o volume e outros podem entrar. Também, se a fonte estiver dentro do volume, nêutrons adicionais podem aparecer provenientes da fonte. Os nêutrons dentro desse volume satisfazem a uma equação de balanço entre produção e desaparecimento de nêutrons, isto é, a taxa de variação temporal do número total de nêutrons em V deve ser igual à taxa na qual os nêutrons são produzidos dentro de V menos a taxa dos que são absorvidos ou escapam de V . Se $n(\mathbf{r}, t)$ é a densidade de nêutrons no ponto $\mathbf{r}$ e no tempo t , o número total de nêutrons em V é $\int_V n(\mathbf{r}, t) dV$ [16]. A condição de continuidade pode ser escrita como,

$$\frac{d}{dt} \int_V n(\mathbf{r}, t) dV = \text{taxa de produção} - \text{taxa de absorção} - \text{taxa de fuga}, \quad (4.2)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V n(\mathbf{r}, t) dV = \int_V \nabla \phi(\mathbf{r}) \Sigma_f(\mathbf{r}) dV - \int_V \Sigma_a(\mathbf{r}) \phi(\mathbf{r}, t) dV - \int_V \text{div} \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) dV, \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial n(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \nabla \phi(\mathbf{r}) \Sigma_f(\mathbf{r}) - \Sigma_a(\mathbf{r}) \phi(\mathbf{r}, t) - \text{div} \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) \quad (4.4)$$

onde,

- n é a densidade de nêutrons em n/cm^3 ;
- t é o tempo em s ;
- ϕ é fluxo de nêutrons em $n/cm^2.s$;
- $\nabla \phi \Sigma_f$ é o número de nêutrons emitidos pela fonte, em $n/cm^3.s$, onde $\nabla \phi$ representa o gradiente de fluxo de nêutrons e Σ_f é a seção de macroscópica de fissão em cm^{-1} ;
- $\mathbf{r}$ é a posição em cm ;
- Σ_a é a seção de choque macroscópica de absorção em cm^{-1} ; e
- $\mathbf{J}$ é a corrente de nêutrons em $n/cm^2.s$.

A relação entre fluxo e corrente de nêutrons se torna simples se algumas condições são encontradas. Nesse caso, é possível obter soluções elementares para os problemas de transporte. De acordo com a lei de Fick, nas situações nas quais existem gradientes de concentração de uma substância, ou de temperatura, produz-se um fluxo de partículas ou de calor que tende a homogenizar a dissolução e uniformizar a concentração ou a temperatura. O fluxo homogenizador é uma consequência estatística do movimento aleatório das partículas que dá lugar ao segundo princípio da termodinâmica, conhecido também como movimento térmico casual das partículas. Assim, os processos físicos de difusão podem ser vistos como processos físicos ou termodinâmicos irreversíveis.

A lei de Fick,

$$\mathbf{J} = -D\nabla\phi, \quad (4.5)$$

onde D é o coeficiente de difusão e $\nabla\phi$ representa o gradiente de fluxo de nêutrons, fornece a relação entre fluxo e corrente. Substituindo a Eq. (4.5) na Eq. (4.4) obtém-se:

$$\nabla D\nabla\phi - \Sigma_a\phi + v\sigma\phi = \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (4.6)$$

como $\phi = nv$ a Eq. (4.6) fica

$$D\nabla^2\phi - \Sigma_a\phi + v\Sigma\phi = \frac{1}{v}\frac{\partial\phi}{\partial t}. \quad (4.7)$$

Essa equação é conhecida como equação de difusão de nêutrons.

A maioria dos problemas de projeto necessitam de soluções em estado estacionário. Normalmente, elimina-se o termo de derivada temporal e introduz-se um fator k , denominado fator efetivo de multiplicação, para realizar o balanço de nêutrons dividindo o termo de fissão. A equação de difusão se transforma em uma equação de autovalor (Eq. (4.7)) cuja a solução fornece o fluxo de nêutrons e o auto valor, o fator efetivo de multiplicação.

$$-D\nabla^2\phi + \Sigma_a\phi = \frac{v}{k}\sigma_f\phi \quad (4.8)$$

onde,

- ∇^2 = O operador geométrico Laplaciano, $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ em geometria retangular, cm^{-2} ; e
- v é o número de nêutrons produzidos por fissão.

Programa Computacional 2DB

O programa computacional 2DB foi desenvolvido em 1969 pelo “Pacific Northwest Laboratories” em conjunto com “Los Alamos Scientific Laboratory” e para solução da equação de difusão de nêutrons em 2 dimensões e vários grupos de energia. Em 1986 foi atualizado para inclusão de capacidades adicionais de edição, melhoria dos métodos de cálculo e novas opções de input [14]. O 2DB é um código bidimensional ($x - y$, $r - z$, $r - \theta$ e *geometria hexagonal*) de difusão para análise de reatores. O código pode ser usado para:

- calcular a queima do combustível utilizando gerenciamento “in-core”;
- calcular a criticalidade, concentração dos materiais e dimensões de regiões usando um modelo regular ou adjunto. A criticalidade pode ser calculada durante a queima para compensar o consumo do combustível; e
- calcular a distribuição de fluxo para uma fonte arbitrária qualquer.

O 2DB utiliza os seguintes métodos de solução:

- métodos padrões de interação fonte [15];
- rebalanceamento de grupo e “Successive Overrelaxation Method” (SOR) com inversão de linha para acelerar a convergência;
- a queima é feita por regiões no reator;
- a taxa de queima é determinada por zona, grupo de energia e seções de choque médias que são recalculadas após cada “time-step”; e
- as cadeias isotópicas, que podem conter qualquer número de isótopos, são fornecidas pelo usuário.

Para calcular a queima de combustível e o tempo de uma recarga, resolve-se um sistema acoplado de equações não-lineares simultaneamente em um processo iterativo, de forma que a criticalidade é efetuada por alteração nas concentrações de nuclídeos, normalmente por um processo iterativo direto, o k_e é fixado em um valor próximo de 1 e as contribuições

para a seção de choque a partir das concentrações de núclídeos armazenados devem ser incluídas na Eq. (4.12) gerando o sistema da Eq. (4.9)

$$\begin{cases} -D_{\mathbf{r},\mathbf{g}}\nabla^2\phi_{\mathbf{r},g} + (\Sigma_{a,\mathbf{r},g} + \sum_n \Sigma_{s,\mathbf{r},g \rightarrow n} + D_{\mathbf{r},g}B_{\perp g}^2)\phi_{\mathbf{r},g} = \sum_n (\Sigma_{s,\mathbf{r},n \rightarrow g} + \frac{s_g(v\Sigma)_{f,\mathbf{r},n}}{k_e})\phi_{\mathbf{r},n} \\ \frac{\partial N_{w,t}}{\partial t} = -a_{w,t}N_{w,t} + Y_{w,t} + \sum_j G_{j,w-1 \rightarrow w,t}N_{w-1,t} \end{cases}, \quad (4.9)$$

onde,

- $N_{w,t}$ refere-se a uma concentração de núclídeo em uma posição w na cadeia de decaimento no tempo t ;
- $a_{w,t}$ refere-se a constante de destruição do núclídeo w no tempo t ;
- $Y_{w,t}$ é a taxa de produção do núclídeo w devido ao rendimento da fissão; e
- $G_{j,w-1 \rightarrow w,t}$ refere-se a taxa de produção de um precursor ao longo da cadeia j .

O sistema de Eqs. (4.9) consiste em um sistema acoplado não-linearmente e para resolver esse sistema deve-se utilizar o processo quase estático que consiste em:

1. Dividir o intervalo de vida do reator em uma série de sub-intervalos;

$$t_R = t_0 + \Delta t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + t_n \quad (4.10)$$

onde,

$$t_n = t_0 + \Delta t_0 + \dots + \Delta t_{n-1}, \quad (4.11)$$

2. Especificar com precisão as dimensões e os carregamentos do núcleo;
3. Assumir que os parâmetros do núcleo permanecem constantes durante Δt e são usados para calcular os parâmetros do próximo intervalo;
4. Resolver o sistema de equações para Φ em t_0 ;
5. Resolver as equações de transmutação assumindo Φ constante durante o intervalo Δt_0 nesse cálculo;

6. Recalcular as seções de choque macroscópicas;
7. Resolver o sistema de equações novamente para Φ no instante t_1 ; e
8. Repetir o processo até a próxima parada para troca de combustível do reator.

Parâmetros Gerados com o 2DB

O núcleo do reator IEA-R1 é composto por diferentes combustíveis e materiais que estão distribuídos em diferentes regiões do mesmo. Cada material possui uma seção de choque característica para cada faixa de energia dos nêutrons incidentes, de forma que para se ter um cálculo mais preciso é necessário discretizar o maior número de materiais e regiões para se gerar o maior banco de dados de seções de choque para uma faixa de energia dos nêutrons. O reator IEA-R1 é um reator de pesquisa térmico, ou seja, a grande maioria das fissões ocorrem na faixa dos nêutrons térmicos ($E < 1eV$), pois a seção de choque de fissão para o material físsil (^{235}U) é maior para essa faixa de energia. Utilizando o programa computacional 2DB foram modeladas 97 regiões, incluindo o DIM composto por 10 miniplacas de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ com $4,8 \text{ gU/cm}^3$, do núcleo do reator IEA-R1 para dois grupos de com energia (um rápido e outro térmico). No cálculo, foi considerado que todas as miniplacas são de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ com uma densidade de urânio de $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Essa situação gerará à máxima densidade de potência nas miniplacas, devido a máxima densidade de urânio usada. A partir dessa modelagem, os seguintes parâmetros de difusão foram calculados para cada uma das regiões:

- coeficiente de difusão médio D ;
- seção de choque de absorção Σ_a ;
- seção de choque de produção $\nu\Sigma_f$; e
- potência por unidade de fluxo Watts/fissão.

Esses parâmetros serviram como dados de entrada para o programa CITATION que a partir do mesmos gera o k-efetivo, fluxo de nêutrons e densidade de potência, parâmetros estes que irão determinar o impacto da inserção do DIM em umas das posições de irradiação da placa matriz do reator.

A Tab (4.1) apresenta todos os parâmetros gerados com o 2DB para cada umas das 97 regiões modeladas com dois grupos. A Fig. (3.2) apresenta a configuração 236 adotada como modelo pra modelagem.

Os dados de entrada do programa 2DB são apresentados no Apêndice A. Toda a modelagem foi feita com base na configuração 236 e no histórico de queima dos elementos combustíveis proveniente das configurações anteriores.

Tabela 4.1 - Parâmetros de difusão gerados com o 2DB.

Zona	Grupo	D	Σ_a	$\nu\Sigma_f$	Watts/Fissão
1	1	1,19715E+00	4,73173E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
1	2	1,50885E-01	1,85564E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
2	1	1,26970E+00	4,49833E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
2	2	1,93098E-01	1,72003E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
3	1	1,34744E+00	6,69152E-05	0,00000E+00	0,00000E+00
3	2	9,01264E-01	1,73887E-03	0,00000E+00	0,00000E+00
4	1	7,35386E-01	6,86329E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
4	2	5,12266E-01	2,00393E-03	0,00000E+00	0,00000E+00
5	1	6,71784E-01	6,46733E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
5	2	5,16651E-01	9,75944E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
6	1	1,28834E+00	4,39394E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
6	2	2,13823E-01	1,61184E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
7	1	1,10753E+00	5,64645E-03	0,00000E+00	0,00000E+00
7	2	3,07072E-01	2,25904E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
8	1	1,26970E+00	4,49833E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
8	2	1,93098E-01	1,72003E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
9	1	1,26970E+00	4,49833E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
9	2	1,93098E-01	1,72003E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
10	1	1,26970E+00	4,49833E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
10	2	1,93098E-01	1,72003E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
11	1	1,26970E+00	4,49833E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
11	2	1,93098E-01	1,72003E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
12	1	1,26970E+00	4,49833E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
12	2	1,93098E-01	1,72003E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
13	1	1,26970E+00	4,49833E-04	0,00000E+00	0,00000E+00

Continua na próxima página. . .

Tabela 4.1 - Parâmetros de difusão gerados com o 2DB.

Zona	Grupo	D	Σ_a	$v\Sigma_f$	Watts/Fissão
13	2	1,93098E-01	1,72003E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
14	1	1,26970E+00	4,49833E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
14	2	1,93098E-01	1,72003E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
15	1	1,26970E+00	4,49833E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
15	2	1,93098E-01	1,72003E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
16	1	1,26970E+00	4,49833E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
16	2	1,93098E-01	1,72003E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
17	1	1,41108E+00	3,79741E-03	2,47596E-03	3,19847E-14
17	2	2,81156E-01	6,60146E-02	1,00127E-01	1,31093E-12
18	1	1,41081E+00	3,83741E-03	2,74371E-03	3,55528E-14
18	2	2,82915E-01	7,03564E-02	1,10204E-01	1,44709E-12
19	1	1,41082E+00	3,83703E-03	2,74123E-03	3,55198E-14
19	2	2,82899E-01	7,03171E-02	1,10112E-01	1,44585E-12
20	1	1,41107E+00	3,79925E-03	2,48789E-03	3,21502E-14
20	2	2,81239E-01	6,62198E-02	1,00602E-01	1,31734E-12
21	1	1,41457E+00	4,75436E-03	4,32840E-03	5,63800E-14
21	2	2,92460E-01	9,60346E-02	1,65325E-01	2,18366E-12
22	1	1,41478E+00	4,71571E-03	4,12608E-03	5,36688E-14
22	2	2,91406E-01	9,33843E-02	1,58719E-01	2,09266E-12
23	1	1,41094E+00	3,81777E-03	2,61423E-03	3,38191E-14
23	2	2,82068E-01	6,82684E-02	1,05350E-01	1,38142E-12
24	1	1,41483E+00	4,70834E-03	4,08360E-03	5,31050E-14
24	2	2,91183E-01	9,28153E-02	1,57326E-01	2,07352E-12
25	1	1,41473E+00	4,72392E-03	4,17203E-03	5,42809E-14
25	2	2,91646E-01	9,39956E-02	1,60223E-01	2,11335E-12
26	1	1,41099E+00	3,81089E-03	2,56751E-03	3,31983E-14
26	2	2,81761E-01	6,75107E-02	1,03592E-01	1,35769E-12
27	1	1,41085E+00	3,83115E-03	2,70261E-03	3,50068E-14
27	2	2,82651E-01	6,97034E-02	1,08683E-01	1,42651E-12
28	1	1,41100E+00	3,80878E-03	2,55319E-03	3,30082E-14
28	2	2,81667E-01	6,72777E-02	1,03052E-01	1,35040E-12
29	1	1,41440E+00	4,79109E-03	4,49900E-03	5,86726E-14
29	2	2,92672E-01	9,78647E-02	1,71800E-01	2,27267E-12

Continua na próxima página. . .

Tabela 4.1 - Parâmetros de difusão gerados com o 2DB.

Zona	Grupo	D	Σ_a	$v\Sigma_f$	Watts/Fissão
30	1	1,41549E+00	4,61624E-03	3,46531E-03	4,48381E-14
30	2	2,87798E-01	8,39279E-02	1,36104E-01	1,78406E-12
31	1	1,41546E+00	4,62076E-03	3,49796E-03	4,52741E-14
31	2	2,87983E-01	8,44195E-02	1,37261E-01	1,79976E-12
32	1	1,41097E+00	3,81357E-03	2,58556E-03	3,34408E-14
32	2	2,81881E-01	6,78073E-02	1,04280E-01	1,36697E-12
33	1	1,41065E+00	3,86290E-03	2,90539E-03	3,77099E-14
33	2	2,83946E-01	7,28926E-02	1,16133E-01	1,52753E-12
34	1	1,41082E+00	3,83661E-03	2,73850E-03	3,54834E-14
34	2	2,82882E-01	7,02737E-02	1,10011E-01	1,44448E-12
35	1	1,41084E+00	3,83216E-03	2,70928E-03	3,50954E-14
35	2	2,82694E-01	6,98097E-02	1,08930E-01	1,42986E-12
36	1	1,41031E+00	3,92866E-03	3,26386E-03	4,25048E-14
36	2	2,86160E-01	7,82432E-02	1,28893E-01	1,70156E-12
37	1	1,41454E+00	4,75914E-03	4,35119E-03	5,66876E-14
37	2	2,92578E-01	9,63199E-02	1,66067E-01	2,19391E-12
38	1	1,41089E+00	3,82493E-03	2,66133E-03	3,44557E-14
38	2	2,82382E-01	6,90400E-02	1,07141E-01	1,40565E-12
39	1	1,41477E+00	4,71771E-03	4,13741E-03	5,38193E-14
39	2	2,91465E-01	9,35353E-02	1,59090E-01	2,09776E-12
40	1	1,41029E+00	3,93165E-03	3,27832E-03	4,26954E-14
40	2	2,86244E-01	7,84469E-02	1,29389E-01	1,70836E-12
41	1	1,41458E+00	4,75193E-03	4,31664E-03	5,62215E-14
41	2	2,92400E-01	9,58858E-02	1,64942E-01	2,17837E-12
42	1	1,41461E+00	4,74666E-03	4,29085E-03	5,58752E-14
42	2	2,92268E-01	9,55540E-02	1,64106E-01	2,16683E-12
43	1	1,41484E+00	4,70576E-03	4,06859E-03	5,29034E-14
43	2	2,91104E-01	9,26108E-02	1,56826E-01	2,06667E-12
44	1	1,41485E+00	4,70446E-03	4,06107E-03	5,28007E-14
44	2	2,91063E-01	9,25062E-02	1,56572E-01	2,06317E-12
45	1	1,40800E+00	3,08901E-03	1,42540E-03	1,81898E-14
45	2	2,72529E-01	4,43616E-02	5,55763E-02	7,24917E-13
46	1	1,40802E+00	3,08799E-03	1,40847E-03	1,79640E-14

Continua na próxima página. . .

Tabela 4.1 - Parâmetros de difusão gerados com o 2DB.

Zona	Grupo	D	Σ_a	$v\Sigma_f$	Watts/Fissão
46	2	2,72393E-01	4,40756E-02	5,48894E-02	7,15552E-13
47	1	1,41488E+00	4,70005E-03	4,03492E-03	5,24488E-14
47	2	2,90924E-01	9,21470E-02	1,55697E-01	2,05117E-12
48	1	1,41493E+00	4,69179E-03	3,98435E-03	5,17684E-14
48	2	2,90651E-01	9,14466E-02	1,53997E-01	2,02789E-12
49	1	1,41473E+00	4,72292E-03	4,16656E-03	5,42078E-14
49	2	2,91617E-01	9,39230E-02	1,60044E-01	2,11088E-12
50	1	1,41571E+00	4,58858E-03	3,26347E-03	4,21470E-14
50	2	2,86642E-01	8,08414E-02	1,28860E-01	1,68595E-12
51	1	1,40800E+00	3,08899E-03	1,42505E-03	1,81851E-14
51	2	2,72527E-01	4,43557E-02	5,55619E-02	7,24722E-13
52	1	1,40786E+00	3,09725E-03	1,54210E-03	1,97497E-14
52	2	2,73468E-01	4,63014E-02	6,02546E-02	7,88873E-13
53	1	1,40795E+00	3,09163E-03	1,46647E-03	1,87373E-14
53	2	2,72862E-01	4,50498E-02	5,72317E-02	7,47513E-13
54	1	1,40815E+00	3,08258E-03	1,29962E-03	1,65000E-14
54	2	2,71494E-01	4,21894E-02	5,03778E-02	6,54194E-13
55	1	1,40743E+00	3,13441E-03	1,89680E-03	2,45376E-14
55	2	2,75646E-01	5,15151E-02	7,41988E-02	9,81546E-13
56	1	1,40743E+00	3,13441E-03	1,89680E-03	2,45376E-14
56	2	2,75646E-01	5,15151E-02	7,41988E-02	9,81546E-13
57	1	1,43101E+00	2,88597E-03	1,72091E-03	2,22769E-14
57	2	2,77484E-01	5,14673E-02	7,15295E-02	9,38626E-13
58	1	1,43106E+00	2,87917E-03	1,67205E-03	2,16269E-14
58	2	2,77104E-01	5,06207E-02	6,95594E-02	9,12104E-13
59	1	1,41558E+00	4,60519E-03	3,38515E-03	4,37653E-14
59	2	2,87340E-01	8,27075E-02	1,33236E-01	1,74518E-12
60	1	1,41547E+00	4,61857E-03	3,48223E-03	4,50641E-14
60	2	2,87894E-01	8,41831E-02	1,36704E-01	1,79221E-12
61	1	1,41570E+00	4,58991E-03	3,27322E-03	4,22758E-14
61	2	2,86698E-01	8,09911E-02	1,29211E-01	1,69069E-12
62	1	1,41521E+00	4,65286E-03	3,72788E-03	4,83416E-14
62	2	2,89261E-01	8,78114E-02	1,45284E-01	1,90886E-12

Continua na próxima página. . .

Tabela 4.1 - Parâmetros de difusão gerados com o 2DB.

Zona	Grupo	D	Σ_a	$v\Sigma_f$	Watts/Fissão
63	1	1,40779E+00	3,10179E-03	1,59540E-03	2,04711E-14
63	2	2,73896E-01	4,71753E-02	6,23784E-02	8,18016E-13
64	1	1,40799E+00	3,08913E-03	1,42732E-03	1,82154E-14
64	2	2,72545E-01	4,43939E-02	5,56539E-02	7,25975E-13
65	1	1,40785E+00	3,09780E-03	1,54880E-03	1,98399E-14
65	2	2,73522E-01	4,64116E-02	6,05216E-02	7,92533E-13
66	1	1,40794E+00	3,09185E-03	1,46971E-03	1,87807E-14
66	2	2,72888E-01	4,51040E-02	5,73623E-02	7,49297E-13
67	1	1,40759E+00	3,11899E-03	1,76616E-03	2,27748E-14
67	2	2,75228E-01	4,98368E-02	6,89962E-02	9,09341E-13
68	1	1,40755E+00	3,12304E-03	1,80104E-03	2,32443E-14
68	2	2,75492E-01	5,03496E-02	7,03144E-02	9,27637E-13
69	1	1,40755E+00	3,12311E-03	1,80166E-03	2,32527E-14
69	2	2,75496E-01	5,03585E-02	7,03379E-02	9,27962E-13
70	1	1,40751E+00	3,12736E-03	1,83691E-03	2,37288E-14
70	2	2,75761E-01	5,08736E-02	7,16625E-02	9,46388E-13
71	1	1,40802E+00	3,08793E-03	1,40749E-03	1,79508E-14
71	2	2,72385E-01	4,40590E-02	5,48494E-02	7,15007E-13
72	1	1,40788E+00	3,09557E-03	1,52093E-03	1,94661E-14
72	2	2,73299E-01	4,59536E-02	5,94126E-02	7,77338E-13
73	1	1,43112E+00	2,87154E-03	1,61494E-03	2,08675E-14
73	2	2,76655E-01	4,96222E-02	6,72411E-02	8,80922E-13
74	1	1,43109E+00	2,87561E-03	1,64572E-03	2,12767E-14
74	2	2,76898E-01	5,01615E-02	6,84925E-02	8,97750E-13
75	1	1,40758E+00	3,11992E-03	1,77440E-03	2,28863E-14
75	2	2,75291E-01	4,99591E-02	6,93102E-02	9,13696E-13
76	1	1,40743E+00	3,13441E-03	1,89680E-03	2,45376E-14
76	2	2,75646E-01	5,15151E-02	7,41988E-02	9,81546E-13
77	1	1,41440E+00	4,79109E-03	4,49900E-03	5,86726E-14
77	2	2,92672E-01	9,78647E-02	1,71800E-01	2,27267E-12
78	1	1,41440E+00	4,79109E-03	4,49900E-03	5,86726E-14
78	2	2,92672E-01	9,78647E-02	1,71800E-01	2,27267E-12
79	1	1,40743E+00	3,13441E-03	1,89680E-03	2,45376E-14

Continua na próxima página. . .

Tabela 4.1 - Parâmetros de difusão gerados com o 2DB.

Zona	Grupo	D	Σ_a	$v\Sigma_f$	Watts/Fissão
79	2	2,75646E-01	5,15151E-02	7,41988E-02	9,81546E-13
80	1	1,40743E+00	3,13441E-03	1,89680E-03	2,45376E-14
80	2	2,75646E-01	5,15151E-02	7,41988E-02	9,81546E-13
81	1	1,41440E+00	4,79109E-03	4,49900E-03	5,86726E-14
81	2	2,92672E-01	9,78647E-02	1,71800E-01	2,27267E-12
82	1	1,26970E+00	4,49833E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
82	2	1,93098E-01	1,72003E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
83	1	1,26970E+00	4,49833E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
83	2	1,93098E-01	1,72003E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
84	1	1,26970E+00	4,49833E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
84	2	1,93098E-01	1,72003E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
85	1	1,26970E+00	4,49833E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
85	2	1,93098E-01	1,72003E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
86	1	1,26970E+00	4,49833E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
86	2	1,93098E-01	1,72003E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
87	1	1,34744E+00	6,69152E-05	0,00000E+00	0,00000E+00
87	2	9,01264E-01	1,73887E-03	0,00000E+00	0,00000E+00
88	1	1,34744E+00	6,69152E-05	0,00000E+00	0,00000E+00
88	2	9,01264E-01	1,73887E-03	0,00000E+00	0,00000E+00
89	1	6,71784E-01	6,46733E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
89	2	5,16651E-01	9,75944E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
90	1	6,71784E-01	6,46733E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
90	2	5,16651E-01	9,75944E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
91	1	1,34784E+00	4,07772E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
91	2	2,85123E-01	1,37978E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
92	1	1,25173E+00	4,58251E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
92	2	1,78126E-01	1,74661E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
93	1	1,64183E+00	3,69438E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
93	2	4,98082E-01	1,29354E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
94	1	1,34784E+00	4,07772E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
94	2	2,85123E-01	1,37978E-02	0,00000E+00	0,00000E+00
95	1	1,29674E+00	7,85307E-03	8,18440E-03	1,06862E-13
95	2	2,70712E-01	1,46586E-01	2,71843E-01	3,59638E-12

Continua na próxima página. . .

Tabela 4.1 - Parâmetros de difusão gerados com o 2DB.

Zona	Grupo	D	Σ_a	$v\Sigma_f$	Watts/Fissão
96	1	1,29674E+00	7,85307E-03	8,18440E-03	1,06862E-13
96	2	2,70712E-01	1,46586E-01	2,71843E-01	3,59638E-12
97	1	1,64248E+00	3,67779E-04	0,00000E+00	0,00000E+00
97	2	5,05496E-01	1,27862E-02	0,00000E+00	0,00000E+00

Programa Computacional CITATION

Em 1969, foi publicada a primeira versão do programa computacional CITATION desenvolvida para resolver problemas envolvendo a representação de diferenças finitas da teoria de difusão que trata até três dimensões do espaço com a dispersão arbitrária de grupo-a-grupo [13]. O CITATION resolve os seguintes problemas nas geometrias $x - y - z$, $\theta - r - z$, *hexagonal* - z e *triagonal* - z :

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

O CITATION resolve a equação de difusão que expressa uma aproximação para o transporte de nêutrons em uma posição $\bar{\mathbf{r}}$ e energia E . São descritas aqui as equações no modelo de multi-grupo [16] que são usadas para obter um tipo da diferença finita de contrapeso do nêutron sobre elementos discretos do volume.

$$-D_{\mathbf{r},\mathbf{g}}\nabla^2\phi_{\mathbf{r},g} + (\Sigma_{a,\mathbf{r},g} + \sum_n \Sigma_{s,\mathbf{r},g \rightarrow n} + D_{\mathbf{r},g}B_{\perp g}^2)\phi_{\mathbf{r},g} = \sum_n (\Sigma_{s,\mathbf{r},n \rightarrow g} + \frac{s_g(v\Sigma)_{f,\mathbf{r},n}}{k_e})\phi_{\mathbf{r},n}, \quad (4.12)$$

onde,

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

Cálculo e Modelagem do Núcleo do Reator IEA-R1

Para definir o impacto no núcleo devido à inserção do DIM na placa matriz do reator, foi analisada a situação crítica de operação do reator que ocorre com o DIM contendo 10 miniplacas combustíveis de U_3Si_2-Al com 4,8 gU/cm³ e o reator operando a 120 horas semanais a 5 MW.

Os parâmetros determinados na Tab. (4.1) pelo programa 2DB foram utilizados como dados de entrada do programa CITATION para modelagem e cálculo do núcleo. O Apêndice B apresenta os dados de entrada de uma das três modelagens (uma para cada posição de irradiação do DIM: 26, 36 e 37) feitas com programa CITATION para o cálculo tridimensional do núcleo. As 97 regiões modeladas foram dispostas em uma geometria $x - y - z$ sendo cada eixo dividido em mechas, de forma que:

- x , que corresponde a largura da placa matriz de 109,672 cm, foi dividido em 128 mechas;
- y , que corresponde ao comprimento da placa matriz de 129,000 cm, foi dividido em 148 mechas; e
- z , que corresponde a altura de 122,740 cm dos Elementos Combustíveis e Irradiadores fixos na placa matriz por um bocal, foi dividido em 82 mechas.

Com a modelagem tridimensional do núcleo no CITATION foi possível determinar o k -efetivo, o fluxo de nêutrons e a densidade de potência para qualquer posição $\bar{r}$ nas dimensões da placa matriz.

Três posições de irradiação tinham sido cedidas pelo Centro do Reator de Pesquisa (CRPq) na placa matriz do núcleo do reator para a inserção do DIM: 1) posição 26; 2) posição 37; 3) posição 36. As posições na placa matriz do reator podem ser identificadas na Fig. (3.2) como um sistema de coordenadas cartesiano, ou seja, as linhas correspondem a dezena e as colunas a unidade, de forma que seguindo as coordenadas até o ponto em que se cruzam, encontra-se a posição desejada. Cada uma das posições foi analisada e os parâmetros k -efetivo, fluxo de nêutrons e densidade de potência foram obtidos ao longo do eixo z do irradiador (como mostrado nas Tabs. (4.3), (4.4) e (4.5)).

A Tab. (4.2) apresenta os resultados das simulações feitas para cada uma das posições de irradiação. Essas simulações foram feitas para se verificar a influência do DIM sobre o k -efetivo do núcleo quando o mesmo estiver inserido na placa matriz do reator. Cada posição foi simulada em 2 estados: primeiro sem o DIM e segundo com o mesmo inserido. Da tabela pode ser observado que em todas as posições há uma queda no k_e , ou seja, há uma inserção de reatividade negativa no núcleo, quando o DIM esta inserido. A queda na reatividade do núcleo ocorre por causa da retirada do refletor de berílio, que age como um “espelho” refletindo os nêutrons que escapariam de volta para o núcleo ativo. Os refletores refletem mais nêutrons para o núcleo ativo do reator do que a quantidade de nêutrons produzidos por fissão do combustível contido no DIM. Da tabela também pode ser observado que a maior reatividade negativa inserida ocorre para o DIM na posição 36. Isso ocorre por causa da proximidade da posição em relação ao centro do núcleo, onde se tem uma maior importância de nêutrons, de forma que, quando o refletor é retirado

da posição 36 para a inserção do DIM, a quantidade de nêutrons que escapam do núcleo ativo é muito maior do que a quantidade inserida de nêutrons produzidos por fissão no combustível das miniplacas alojadas no DIM. A menor inserção de reatividade, como pode ser observado na tabela, ocorre para o DIM inserido na posição 26, que fica localizada acima da posição 36 que neste caso estará ocupada por um refletor de berílio, de forma que, antes dos nêutrons escaparem pela posição 26, eles são refletidos de volta pelo refletor da posição 36. Nesta posição, a inserção de nêutrons no núcleo ativo, produzidos por fissão no DIM é irrelevante em consequência do refletor inserido na posição 36.

Tabela 4.2 - Variação do k-efetivo no núcleo devido à inserção do DIM nas posições de irradiação (26, 36 e 37).

Placa Matriz sem o DIM	Placa Matriz com o DIM inserido	Diferença em PCMs
Posição 26 $k_e = 1,0906$	Posição 26 $k_e = 1,0894$	120
Posição 36 $k_e = 1,0910$	Posição 36 $k_e = 1,0860$	500
Posição 37 $k_e = 1,0792$	Posição 37 $k_e = 1,0754$	380

As Tabs. (4.3), (4.4) e (4.5) apresentam, respectivamente, os parâmetros calculados para o DIM nas posições 26, 36 e 37. Das tabelas pode ser observado que a densidade de potência só é encontrada entre 60,23 e 70,85 *cm* (mechas 38 a 47) de altura da placa matriz do núcleo do reator IEA-R1 onde se encontram posicionadas as miniplacas no DIM. Também pode ser observado destas tabelas que das três posições no núcleo, a máxima densidade de potência é obtida na posição 36, pelo fato da mesma se encontrar mais próxima do centro do núcleo do reator IEA-R1, onde se tem um fluxo de nêutron mais elevado. As menores densidades de potência foram obtidas na posição 26 por estar mais distante do centro do núcleo do reator.

Tabela 4.3 - Parâmetros neutrônicos gerados com o CITATION (Posição 26).

Mechas	z(cm)	Densidade de pot. (W/cm^3)	Fl. de nêutrons rápidos	Fl. de nêutrons térmicos
1	1,00000	0,00000E+00	3,59720E+10	8,11420E+10
2	3,00000	0,00000E+00	6,08250E+10	1,96820E+11
3	5,00000	0,00000E+00	9,34200E+10	3,28090E+11

Continua na próxima página. . .

Tabela 4.3 - Parâmetros neutrônicos gerados com o CITATION (Posição 26).

Mechas	z(cm)	Densidade de pot. (W/cm^3)	Fl. de nêutrons rápidos	Fl. de nêutrons térmicos
4	7,00000	0,00000E+00	1,37830E+11	4,95120E+11
5	9,00000	0,00000E+00	1,99520E+11	7,19660E+11
6	11,00000	0,00000E+00	2,85870E+11	1,02810E+12
7	13,00000	0,00000E+00	4,06900E+11	1,45370E+12
8	15,00000	0,00000E+00	5,76040E+11	2,03920E+12
9	17,00000	0,00000E+00	8,10960E+11	2,83740E+12
10	19,00000	0,00000E+00	1,13420E+12	3,91010E+12
11	21,00000	0,00000E+00	1,57270E+12	5,31720E+12
12	23,00000	0,00000E+00	2,15460E+12	7,07980E+12
13	24,85670	0,00000E+00	2,82710E+12	8,75650E+12
14	26,57000	0,00000E+00	3,47210E+12	1,00890E+13
15	28,28330	0,00000E+00	4,14490E+12	1,14200E+13
16	29,83750	0,00000E+00	4,76740E+12	1,26430E+13
17	31,23250	0,00000E+00	5,32730E+12	1,37530E+13
18	32,62750	0,00000E+00	5,88240E+12	1,48690E+13
19	34,02250	0,00000E+00	6,42750E+12	1,59830E+13
20	35,41750	0,00000E+00	6,95850E+12	1,70880E+13
21	36,81250	0,00000E+00	7,47260E+12	1,81730E+13
22	38,20750	0,00000E+00	7,96760E+12	1,92320E+13
23	39,60250	0,00000E+00	8,44230E+12	2,02580E+13
24	40,99750	0,00000E+00	8,89650E+12	2,12470E+13
25	42,39250	0,00000E+00	9,33060E+12	2,21930E+13
26	43,78750	0,00000E+00	9,74610E+12	2,30930E+13
27	45,18250	0,00000E+00	1,01450E+13	2,39450E+13
28	46,57750	0,00000E+00	1,05330E+13	2,47470E+13
29	47,97250	0,00000E+00	1,09150E+13	2,54950E+13
30	49,36750	0,00000E+00	1,13020E+13	2,61810E+13
31	50,76250	0,00000E+00	1,17110E+13	2,67900E+13
32	52,15750	0,00000E+00	1,21680E+13	2,72870E+13
33	53,55250	0,00000E+00	1,27150E+13	2,75900E+13
34	54,94750	0,00000E+00	1,34250E+13	2,75340E+13
35	56,34250	0,00000E+00	1,44180E+13	2,67890E+13
36	57,69000	0,00000E+00	1,57780E+13	2,52570E+13

Continua na próxima página. . .

Tabela 4.3 - Parâmetros neutrônicos gerados com o CITATION (Posição 26).

Mechas	z(cm)	Densidade de pot. (W/cm^3)	Fl. de nêutrons rápidos	Fl. de nêutrons térmicos
37	58,99000	0,00000E+00	1,72980E+13	2,34040E+13
38	60,23000	7,08800E+01	1,98000E+13	1,91200E+13
39	61,41000	6,57800E+01	2,08550E+13	1,76710E+13
40	62,59000	6,35040E+01	2,13580E+13	1,70230E+13
41	63,77000	6,22470E+01	2,15580E+13	1,66680E+13
42	64,95000	6,14190E+01	2,15490E+13	1,64380E+13
43	66,13000	6,08250E+01	2,13660E+13	1,62780E+13
44	67,31000	6,04560E+01	2,10150E+13	1,61860E+13
45	68,49000	6,04820E+01	2,04700E+13	1,62090E+13
46	69,67000	6,14270E+01	1,96540E+13	1,64960E+13
47	70,85000	6,49090E+01	1,83500E+13	1,75030E+13
48	72,09000	0,00000E+00	1,57540E+13	2,10390E+13
49	73,39000	0,00000E+00	1,40790E+13	2,23240E+13
50	74,84000	0,00000E+00	1,24330E+13	2,31970E+13
51	76,44000	0,00000E+00	1,11050E+13	2,30150E+13
52	78,04000	0,00000E+00	1,00980E+13	2,21890E+13
53	79,64000	0,00000E+00	9,26530E+12	2,10820E+13
54	81,24000	0,00000E+00	8,52740E+12	1,98520E+13
55	82,84000	0,00000E+00	7,83950E+12	1,85680E+13
56	84,44000	0,00000E+00	7,17770E+12	1,72600E+13
57	86,04000	0,00000E+00	6,52970E+12	1,59460E+13
58	87,64000	0,00000E+00	5,89110E+12	1,46360E+13
59	89,24000	0,00000E+00	5,26320E+12	1,33390E+13
60	90,84000	0,00000E+00	4,65200E+12	1,20550E+13
61	92,27330	0,00000E+00	4,12860E+12	1,09060E+13
62	93,54000	0,00000E+00	3,69120E+12	9,86860E+12
63	94,80670	0,00000E+00	3,28810E+12	8,77380E+12
64	95,95670	0,00000E+00	2,96170E+12	7,65510E+12
65	96,99000	0,00000E+00	2,70900E+12	6,54880E+12
66	98,02330	0,00000E+00	2,50430E+12	5,37770E+12
67	99,25000	0,00000E+00	2,34790E+12	4,43280E+12
68	100,67000	0,00000E+00	2,17010E+12	3,88190E+12
69	102,09000	0,00000E+00	1,98400E+12	3,40200E+12

Continua na próxima página. . .

Tabela 4.3 - Parâmetros neutrônicos gerados com o CITATION (Posição 26).

Mechas	z(cm)	Densidade de pot. (W/cm^3)	Fl. de nêutrons rápidos	Fl. de nêutrons térmicos
70	103,51000	0,00000E+00	1,79610E+12	2,98810E+12
71	104,93000	0,00000E+00	1,61070E+12	2,63400E+12
72	106,35000	0,00000E+00	1,43060E+12	2,33430E+12
73	107,77000	0,00000E+00	1,25740E+12	2,08420E+12
74	109,19000	0,00000E+00	1,09200E+12	1,88080E+12
75	110,61000	0,00000E+00	9,34370E+11	1,72210E+12
76	112,03000	0,00000E+00	7,84250E+11	1,60780E+12
77	113,57330	0,00000E+00	5,97190E+11	1,44010E+12
78	115,24000	0,00000E+00	4,28480E+11	1,14400E+12
79	116,90670	0,00000E+00	3,04640E+11	8,64340E+11
80	118,57330	0,00000E+00	2,12910E+11	6,13750E+11
81	120,24000	0,00000E+00	1,43750E+11	3,86950E+11
82	121,90670	0,00000E+00	8,98950E+10	1,67010E+11

Tabela 4.4 - Parâmetros neutrônicos gerados com o CITATION (Posição 36).

Mechas	z(cm)	Densidade de pot. (W/cm^3)	Fl. de nêutrons rápidos	Fl. de nêutrons térmicos
1	1,00000	0,00000E+00	1,15000E+11	2,42000E+11
2	3,00000	0,00000E+00	1,94000E+11	5,84000E+11
3	5,00000	0,00000E+00	2,97000E+11	9,70000E+11
4	7,00000	0,00000E+00	4,38000E+11	1,46000E+12
5	9,00000	0,00000E+00	6,35000E+11	2,12000E+12
6	11,00000	0,00000E+00	9,15000E+11	3,02000E+12
7	13,00000	0,00000E+00	1,31000E+12	4,27000E+12
8	15,00000	0,00000E+00	1,88000E+12	5,98000E+12
9	17,00000	0,00000E+00	2,71000E+12	8,28000E+12
10	19,00000	0,00000E+00	3,89000E+12	1,13000E+13
11	21,00000	0,00000E+00	5,58000E+12	1,49000E+13
12	23,00000	0,00000E+00	7,99000E+12	1,89000E+13
13	24,85670	0,00000E+00	1,10000E+13	2,19000E+13

Continua na próxima página...

Tabela 4.4 - Parâmetros neutrônicos gerados com o CITATION (Posição 36).

Mechas	z(cm)	Densidade de pot. (W/cm^3)	Fl. de nêutrons rápidos	Fl. de nêutrons térmicos
14	26,57000	0,00000E+00	1,42000E+13	2,43000E+13
15	28,28330	0,00000E+00	1,79000E+13	2,62000E+13
16	29,83750	0,00000E+00	2,16000E+13	2,77000E+13
17	31,23250	0,00000E+00	2,48000E+13	2,93000E+13
18	32,62750	0,00000E+00	2,79000E+13	3,13000E+13
19	34,02250	0,00000E+00	3,07000E+13	3,36000E+13
20	35,41750	0,00000E+00	3,33000E+13	3,59000E+13
21	36,81250	0,00000E+00	3,58000E+13	3,82000E+13
22	38,20750	0,00000E+00	3,81000E+13	4,04000E+13
23	39,60250	0,00000E+00	4,03000E+13	4,26000E+13
24	40,99750	0,00000E+00	4,24000E+13	4,47000E+13
25	42,39250	0,00000E+00	4,44000E+13	4,67000E+13
26	43,78750	0,00000E+00	4,62000E+13	4,85000E+13
27	45,18250	0,00000E+00	4,79000E+13	5,02000E+13
28	46,57750	0,00000E+00	4,95000E+13	5,18000E+13
29	47,97250	0,00000E+00	5,10000E+13	5,33000E+13
30	49,36750	0,00000E+00	5,25000E+13	5,45000E+13
31	50,76250	0,00000E+00	5,38000E+13	5,55000E+13
32	52,15750	0,00000E+00	5,52000E+13	5,62000E+13
33	53,55250	0,00000E+00	5,66000E+13	5,61000E+13
34	54,94750	0,00000E+00	5,82000E+13	5,45000E+13
35	56,34250	0,00000E+00	6,04000E+13	4,98000E+13
36	57,69000	0,00000E+00	6,34000E+13	4,12000E+13
37	58,99000	0,00000E+00	6,57000E+13	3,71000E+13
38	60,23000	1,19000E+02	6,90000E+13	3,11000E+13
39	61,41000	1,12000E+02	7,03000E+13	2,90000E+13
40	62,59000	1,08000E+02	7,08000E+13	2,80000E+13
41	63,77000	1,06000E+02	7,08000E+13	2,74000E+13
42	64,95000	1,04000E+02	7,04000E+13	2,70000E+13
43	66,13000	1,03000E+02	6,98000E+13	2,67000E+13
44	67,31000	1,03000E+02	6,88000E+13	2,65000E+13
45	68,49000	1,03000E+02	6,75000E+13	2,66000E+13
46	69,67000	1,04000E+02	6,58000E+13	2,70000E+13

Continua na próxima página...

Tabela 4.4 - Parâmetros neutrônicos gerados com o CITATION (Posição 36).

Mechas	z(cm)	Densidade de pot. (W/cm^3)	Fl. de nêutrons rápidos	Fl. de nêutrons térmicos
47	70,85000	1,09000E+02	6,34000E+13	2,84000E+13
48	72,09000	0,00000E+00	5,92000E+13	3,31000E+13
49	73,39000	0,00000E+00	5,59000E+13	3,61000E+13
50	74,84000	0,00000E+00	5,16000E+13	4,30000E+13
51	76,44000	0,00000E+00	4,79000E+13	4,55000E+13
52	78,04000	0,00000E+00	4,48000E+13	4,49000E+13
53	79,64000	0,00000E+00	4,19000E+13	4,31000E+13
54	81,24000	0,00000E+00	3,90000E+13	4,08000E+13
55	82,84000	0,00000E+00	3,61000E+13	3,82000E+13
56	84,44000	0,00000E+00	3,32000E+13	3,55000E+13
57	86,04000	0,00000E+00	3,01000E+13	3,28000E+13
58	87,64000	0,00000E+00	2,70000E+13	3,01000E+13
59	89,24000	0,00000E+00	2,36000E+13	2,76000E+13
60	90,84000	0,00000E+00	2,01000E+13	2,56000E+13
61	92,27330	0,00000E+00	1,69000E+13	2,40000E+13
62	93,54000	0,00000E+00	1,43000E+13	2,25000E+13
63	94,80670	0,00000E+00	1,20000E+13	2,05000E+13
64	95,95670	0,00000E+00	1,02000E+13	1,82000E+13
65	96,99000	0,00000E+00	8,80000E+12	1,56000E+13
66	98,02330	0,00000E+00	7,69000E+12	1,27000E+13
67	99,25000	0,00000E+00	6,80000E+12	1,01000E+13
68	100,67000	0,00000E+00	5,96000E+12	8,66000E+12
69	102,09000	0,00000E+00	5,20000E+12	7,46000E+12
70	103,51000	0,00000E+00	4,51000E+12	6,44000E+12
71	104,93000	0,00000E+00	3,91000E+12	5,58000E+12
72	106,35000	0,00000E+00	3,36000E+12	4,88000E+12
73	107,77000	0,00000E+00	2,88000E+12	4,29000E+12
74	109,19000	0,00000E+00	2,44000E+12	3,83000E+12
75	110,61000	0,00000E+00	2,05000E+12	3,48000E+12
76	112,03000	0,00000E+00	1,69000E+12	3,24000E+12
77	113,57330	0,00000E+00	1,27000E+12	2,91000E+12
78	115,24000	0,00000E+00	8,99000E+11	2,31000E+12
79	116,90670	0,00000E+00	6,31000E+11	1,74000E+12

Continua na próxima página. . .

Tabela 4.4 - Parâmetros neutrônicos gerados com o CITATION (Posição 36).

Mechas	z(cm)	Densidade de pot. (W/cm^3)	Fl. de nêutrons rápidos	Fl. de nêutrons térmicos
80	118,57330	0,00000E+00	4,36000E+11	1,23000E+12
81	120,24000	0,00000E+00	2,91000E+11	7,73000E+11
82	121,90670	0,00000E+00	1,81000E+11	3,33000E+11

Tabela 4.5 - Parâmetros neutrônicos gerados com o CITATION (Posição 37).

Mechas	z(cm)	Densidade de pot. (W/cm^3)	Fl. de nêutrons rápidos	Fl. de nêutrons térmicos
1	1,00000	0,00000E+00	8,43660E+10	1,81430E+11
2	3,00000	0,00000E+00	1,42120E+11	4,37040E+11
3	5,00000	0,00000E+00	2,17190E+11	7,23780E+11
4	7,00000	0,00000E+00	3,18930E+11	1,08560E+12
5	9,00000	0,00000E+00	4,60240E+11	1,56980E+12
6	11,00000	0,00000E+00	6,59480E+11	2,23380E+12
7	13,00000	0,00000E+00	9,43150E+11	3,15070E+12
8	15,00000	0,00000E+00	1,34980E+12	4,41120E+12
9	17,00000	0,00000E+00	1,93580E+12	6,12060E+12
10	19,00000	0,00000E+00	2,78280E+12	8,37840E+12
11	21,00000	0,00000E+00	4,00750E+12	1,12250E+13
12	23,00000	0,00000E+00	5,76720E+12	1,45250E+13
13	24,85670	0,00000E+00	8,00660E+12	1,72190E+13
14	26,57000	0,00000E+00	1,04340E+13	1,93520E+13
15	28,28330	0,00000E+00	1,33280E+13	2,11850E+13
16	29,83750	0,00000E+00	1,62660E+13	2,25230E+13
17	31,23250	0,00000E+00	1,87980E+13	2,40330E+13
18	32,62750	0,00000E+00	2,11580E+13	2,58490E+13
19	34,02250	0,00000E+00	2,33550E+13	2,78370E+13
20	35,41750	0,00000E+00	2,54110E+13	2,98840E+13
21	36,81250	0,00000E+00	2,73420E+13	3,19190E+13
22	38,20750	0,00000E+00	2,91590E+13	3,38980E+13
23	39,60250	0,00000E+00	3,08690E+13	3,57980E+13

Continua na próxima página...

Tabela 4.5 - Parâmetros neutrônicos gerados com o CITATION (Posição 37).

Mechas	z(cm)	Densidade de pot. (W/cm^3)	Fl. de nêutrons rápidos	Fl. de nêutrons térmicos
24	40,99750	0,00000E+00	3,24770E+13	3,76060E+13
25	42,39250	0,00000E+00	3,39880E+13	3,93150E+13
26	43,78750	0,00000E+00	3,54030E+13	4,09200E+13
27	45,18250	0,00000E+00	3,67280E+13	4,24170E+13
28	46,57750	0,00000E+00	3,79680E+13	4,38010E+13
29	47,97250	0,00000E+00	3,91290E+13	4,50590E+13
30	49,36750	0,00000E+00	4,02240E+13	4,61680E+13
31	50,76250	0,00000E+00	4,12720E+13	4,70740E+13
32	52,15750	0,00000E+00	4,23070E+13	4,76550E+13
33	53,55250	0,00000E+00	4,33880E+13	4,76510E+13
34	54,94750	0,00000E+00	4,46310E+13	4,64900E+13
35	56,34250	0,00000E+00	4,62670E+13	4,29730E+13
36	57,69000	0,00000E+00	4,86370E+13	3,67790E+13
37	58,99000	0,00000E+00	5,05390E+13	3,34450E+13
38	60,23000	1,07150E+02	5,33690E+13	2,82080E+13
39	61,41000	1,00620E+02	5,44330E+13	2,63610E+13
40	62,59000	9,73420E+01	5,48420E+13	2,54370E+13
41	63,77000	9,53680E+01	5,48650E+13	2,48880E+13
42	64,95000	9,40260E+01	5,45990E+13	2,45220E+13
43	66,13000	9,30680E+01	5,40820E+13	2,42710E+13
44	67,31000	9,24770E+01	5,33210E+13	2,41300E+13
45	68,49000	9,24540E+01	5,22900E+13	2,41540E+13
46	69,67000	9,35850E+01	5,09140E+13	2,45090E+13
47	70,85000	9,75840E+01	4,89620E+13	2,56790E+13
48	72,09000	0,00000E+00	4,54210E+13	2,98280E+13
49	73,39000	0,00000E+00	4,27440E+13	3,21570E+13
50	74,84000	0,00000E+00	3,93700E+13	3,69750E+13
51	76,44000	0,00000E+00	3,65270E+13	3,85670E+13
52	78,04000	0,00000E+00	3,41150E+13	3,79100E+13
53	79,64000	0,00000E+00	3,18690E+13	3,62760E+13
54	81,24000	0,00000E+00	2,96660E+13	3,42000E+13
55	82,84000	0,00000E+00	2,74440E+13	3,19100E+13
56	84,44000	0,00000E+00	2,51680E+13	2,95120E+13

Continua na próxima página. . .

Tabela 4.5 - Parâmetros neutrônicos gerados com o CITATION (Posição 37).

Mechas	z(cm)	Densidade de pot. (W/cm^3)	Fl. de nêutrons rápidos	Fl. de nêutrons térmicos
57	86,04000	0,00000E+00	2,28150E+13	2,70790E+13
58	87,64000	0,00000E+00	2,03590E+13	2,46950E+13
59	89,24000	0,00000E+00	1,77740E+13	2,24820E+13
60	90,84000	0,00000E+00	1,50450E+13	2,05990E+13
61	92,27330	0,00000E+00	1,25420E+13	1,92090E+13
62	93,54000	0,00000E+00	1,05190E+13	1,77730E+13
63	94,80670	0,00000E+00	8,76700E+12	1,60360E+13
64	95,95670	0,00000E+00	7,42610E+12	1,41120E+13
65	96,99000	0,00000E+00	6,41370E+12	1,20600E+13
66	98,02330	0,00000E+00	5,59500E+12	9,75320E+12
67	99,25000	0,00000E+00	4,94180E+12	7,79920E+12
68	100,67000	0,00000E+00	4,33450E+12	6,70920E+12
69	102,09000	0,00000E+00	3,78820E+12	5,78580E+12
70	103,51000	0,00000E+00	3,29880E+12	5,00520E+12
71	104,93000	0,00000E+00	2,86110E+12	4,34840E+12
72	106,35000	0,00000E+00	2,46940E+12	3,80050E+12
73	107,77000	0,00000E+00	2,11820E+12	3,35020E+12
74	109,19000	0,00000E+00	1,80220E+12	2,98910E+12
75	110,61000	0,00000E+00	1,51640E+12	2,71210E+12
76	112,03000	0,00000E+00	1,25630E+12	2,51690E+12
77	113,57330	0,00000E+00	9,44860E+11	2,24350E+12
78	115,24000	0,00000E+00	6,69070E+11	1,76740E+12
79	116,90670	0,00000E+00	4,70170E+11	1,32450E+12
80	118,57330	0,00000E+00	3,25320E+11	9,33790E+11
81	120,24000	0,00000E+00	2,17900E+11	5,85500E+11
82	121,90670	0,00000E+00	1,35550E+11	2,51850E+11

4.2 Análise Termo-Hidráulica do DIM

A inserção do DIM na placa matriz do reator IEA-R1 desviará parte do fluido refrigerante que circula no núcleo do reator para resfriar as miniplacas combustíveis. Com isso,

é necessário desenvolver uma análise termo-hidráulica do dispositivo para se determinar a vazão mínima que resfrie as miniplacas, sem prejudicar o resfriamento dos elementos combustíveis que compõem o núcleo do reator.

Como visto anteriormente, o núcleo de reatores de pesquisa tipo piscina possui a geometria de um paralelepípedo reto e é composto por EC, ECT, elementos para irradiação de amostras, irradiadores e refletores. Todos os componentes ficam acoplados verticalmente em furos de uma placa matriz de alumínio, Fig. (3.1), imersa na piscina. O núcleo é refrigerado por circulação forçada de água desmineralizada que se dá no sentido descendente. Após a troca de calor com o núcleo, a água é resfriada em um trocador de calor e reinjetada na parte superior da piscina. A vazão fornecida pela bomba principal do circuito de resfriamento primário é dividida pelos diversos elementos que compõem o núcleo.

4.2.1 Vazão em Núcleos de Reatores de Pesquisa

Para se desenvolver cálculos termo-hidráulicos é necessário determinar a distribuição de vazão no núcleo do reator. Para isso, admite-se que não exista escoamento pelas laterais do núcleo do reator de forma que o escoamento se dá apenas na direção vertical (descendente).

De acordo com Umbehaun [17] [18] a vazão nos elementos da placa matriz é determinada admitindo-se que a perda de carga é igual para todos elementos, de modo que:

$$\Delta H_0 = \Delta H_1 = \Delta H_2 = \Delta H_3 = \Delta H_4 = \Delta H_5 = \Delta H_n, \quad (4.13)$$

onde,

$$\Delta H_i = \sum_{j=i}^n \frac{f_i L_j Q_i^2}{D_j 2g A_j^2} + \sum_{l=1}^m \frac{K_l Q_i^2}{2g A_l^2}, \quad (4.14)$$

sendo,

- ΔH_i a perda de carga em um elemento i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$);
- m o número de singularidades;
- n o número de trechos retos;
- f o fator de fricção;
- L o comprimento de trecho reto em m ;

- Q a vazão em m^3/s ;
- D o diâmetro hidráulico em m ;
- g a aceleração da gravidade em m/s^2 ;
- A a área de escoamento m^2 ; e
- K o coeficiente de perda de carga localizada.

O coeficiente de perda de carga R_i pode ser definida como:

$$R_i = \frac{1}{2g} \left(\sum_{j=1}^n \frac{f_j L_j}{D_j A_j^2} + \sum_{l=1}^m \frac{K_l}{A_l^2} \right). \quad (4.15)$$

Substituindo a Eq. (4.15) na Eq. (4.14), tem-se:

$$\Delta H_i = R_i Q_i^2. \quad (4.16)$$

Deve se destacar que R_i depende da vazão Q_i , pois o fator de fricção f_j esta em função do número de Reynolds, Eq. (4.17):

$$f = 8 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{12}}, \quad (4.17)$$

sendo A e B constantes dependentes do número de Reynolds e da rugosidade do material.

Substituindo a Eq. (4.16) na Eq. (4.13) e isolando a resistência hidráulica R_i obtém-se:

$$R_i Q_i^2 = R_j Q_j^2 \Rightarrow Q_j = \sqrt{\frac{R_i}{R_j}} Q_i \quad (4.18)$$

chamando,

$$R_{ij} = \sqrt{\frac{R_i}{R_j}} \quad (4.19)$$

tem-se:

$$Q_j = R_{ij} Q_i. \quad (4.20)$$

A Eq. (4.20) estabelece a relação entre as vazões nos diferentes elementos e sabendo-se que a vazão total através do núcleo é a mesma fornecida pela bomba principal do circuito de resfriamento primário. Obtém-se:

$$Q_b = A_1 Q_1 + A_2 Q_2 + A_3 Q_3 + A_4 Q_4 + \dots + A_n Q_n \quad (4.21)$$

onde,

- Q_b é a vazão fornecida pela bomba em m^3/s ; e
- $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ são o número de elementos do tipo 1, 2, 3, ..., n que compõe o núcleo.

Substituindo a Eq. (4.20) na Eq. (4.21) obtém-se:

$$Q_b = A_1 Q_1 + A_2 R_{12} Q_1 + \dots + A_n R_{1n} Q_1. \quad (4.22)$$

A partir das Eqs. (4.18) e (4.22) e conhecendo-se a vazão no elemento do tipo 1 pode-se calcular a vazão nos outros elementos.

4.2.2 Critérios de Projeto para Combustíveis MTR Sob Condições de Operação Normal

Critérios e limites de projeto são estabelecidos para combustíveis do tipo MTR de forma a não ocorrer uma mudança geométrica acentuada no elemento combustível e permitir o seu correto funcionamento durante o seu tempo de permanência no reator.

Para efetuar a análise termo-hidráulica do reator foi adotada uma metodologia baseada no TECDOC 231 da IAEA [19]. Seguindo as orientações estabelecidas no “Safety Series SS35” [20] os seguintes critérios são estabelecidos:

- temperatura de mistura do refrigerante $< 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- temperatura média na superfície do revestimento da miniplaca combustível $< 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- temperatura máxima na superfície do revestimento da miniplaca combustível inferior a temperatura de ONB;
- velocidade de escoamento no canal de refrigeração inferior à velocidade crítica de instabilidade mecânica da placa combustível;
- fluxo de calor máximo inferior ao fluxo de calor para instabilidade de fluxo; e
- fluxo de calor máximo inferior ao fluxo de calor crítico.

Velocidade Crítica de Escoamento do Fluido Refrigerante

Nos canais de refrigeração pode não existir um paralelismo perfeito entre as placas combustíveis devido às tolerâncias existentes na fabricação e/ou pelo inchamento do combustível causado pelos produtos de fissão produzidos durante o período de irradiação, de

forma que alguns canais poderão ficar mais fechados que outros. Pela Equação da Continuidade

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (4.23)$$

onde,

- A_1 e A_2 são áreas distintas em um mesmo canal de refrigeração em m^2 ; e
- v_1 e v_2 as velocidades em m/s de escoamento em A_1 e A_2 ;

e pelo princípio de Bernoulli,

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 \quad (4.24)$$

onde,

- p_1 e p_2 são as pressões em *bar*, respectivamente, nas alturas h_1 e h_2 em m ao longo do canal;
- ρ a densidade do fluido refrigerante em kg/m^3 ; e
- g a aceleração da gravidade em m/s^2 .

Conclui-se que num estreitamento de canal, ocorre um aumento de velocidade do fluido refrigerante e queda de pressão estática. A velocidade crítica é a velocidade do fluido refrigerante que torna o gradiente de pressão da ordem da carga crítica de flambagem da placa podendo causar grandes deflexões nas placas combustíveis e possivelmente um bloqueio completo do fluido refrigerante. Para efeito de projeto, recomenda-se que a velocidade do refrigerante seja limitada a $\frac{2}{3}$ da velocidade crítica dada pela Eq. (4.25) [21]

$$v_{crt} \leq \frac{2}{3} \left[\frac{15 * 10^5 E (e_p^3 - e_{cer}^3) e_c}{\rho L_c^4 (1 - v^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.25)$$

sendo,

- E o módulo de elasticidade de Young da placa em *bar*;
- e_p a espessura da placa combustível em m ;

- e_{cer} a espessura da parte ativa da placa combustível em m ;
- e_c a espessura do canal de refrigeração em m ;
- L_c a largura do canal em m ; e
- ν a vazão de Poisson.

Início de Ebulição Nucleada (“Onset of Nucleate Boiling” - ONB)

O ONB é um regime de transferência de calor que deve ser identificado para se evitar um escoamento bifásico que causa oscilações no fluxo de fluido refrigerante e pode afetar as características de transferência de calor local, induzindo a um fluxo de calor crítico prematuro.

O ONB ocorre para uma dada temperatura, pressão local e fluxo de calor superficial no revestimento da placa combustível. A correlação para ONB é dada pela Eq. (4.26) [22].

$$T_s = T_{sat} + \frac{5}{9} \left[\frac{9,23q}{P^{1,156}} \right]^{\frac{P^{0,0234}}{2,16}} \quad (4.26)$$

sendo:

- T_s a temperatura superficial da placa combustível em $^{\circ}C$;
- T_{sat} a temperatura de saturação local em $^{\circ}C$;
- P a pressão local em bar ; e
- q o fluxo local de calor em W/cm^2 .

Instabilidade no Escoamento do Fluido Refrigerante

Em um regime monofásico a relação $Q \leftrightarrow \Delta P$ se dá de forma diretamente proporcional segundo a equação (4.24), mas em escoamentos bifásicos a presença de bolhas de vapor atua como novo mecanismo que afeta drasticamente a relação acima citada. Um aumento da potência fornecida ao canal de refrigeração pode levar à formação de bolhas (ebulição sub-resfriada). As bolhas maiores podem obstruir o canal de refrigeração forçando a fase líquida a acelerar de forma que a vazão mantenha-se constante. O aumento na velocidade

do fluido refrigerante pode levar a um bloqueio completo do canal devido a queda de pressão. O fluxo de calor médio para início da instabilidade no escoamento do fluido é definido pela Eq. (4.27) [17]

$$\bar{q}_c = \rho \frac{R c_p V D_h}{4 L_c} (T_{sat} - T_{in}) \quad (4.27)$$

onde,

- $\bar{q}_c$ é o fluxo de calor médio para instabilidade do fluxo em W/cm^2 ;
- R é a razão entre a subida da temperatura da água ΔT_c na condição de pressão mínima e a diferença ΔT_{sat} entre a temperatura de saturação na saída do canal e a temperatura de entrada;
- c_p é o calor específico da água em J/cm^0C ;
- V velocidade do fluxo em m/s ;
- D_h o diâmetro hidráulico do canal em m ;
- T_{sat} é a temperatura de saturação do fluido na saída do canal em 0C ; e
- T_{in} é a temperatura de entrada do fluido no canal em 0C .

Fluxo de Calor Crítico (Departure From Nucleate Boiling - DNB)

O fluxo de calor crítico para regimes descendentes pode ser determinado pela correlação de Labunstov Eq. (4.28) [23]:

$$q_c = 145,4 \theta(p) \left[\frac{1 + 2,5 V^2}{\theta(p)} \right]^{\frac{1}{4}} \left[\frac{1 + 15,1 C_p \Delta T_{sub}}{\lambda P^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (4.28)$$

onde,

$$\theta(p) = 0,99531 P^{\frac{1}{3}} \left(1 - \frac{P}{P_c} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (4.29)$$

sendo,

- V a velocidade de escoamento em m/s ;

- P a pressão de saída do canal em m ;
- P_c a pressão crítica em bar ; e
- λ o coeficiente de vaporização em J/g^0C ;

$$\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_{in} - \Delta T_c \quad (4.30)$$

sendo,

- ΔT_c a subida de temperatura no canal refrigerante em 0C ;
- T_{sat} a temperatura de saturação do fluido na saída do canal em 0C ; e
- T_{in} a temperatura de entrada do fluido em 0C ;

A Eq. (4.28) vale para os seguintes parâmetros:

- Velocidade: $0,7 - 45 \text{ m/s}$
- Pressão absoluta: $1 - 200 \text{ bar}$
- Sub-resfriamento: $0 - 240 \text{ }^0C$
- q_c : $116 - 5234 \text{ W/cm}^2$

4.2.3 Programa Computacional MTRCR-IEA-R1

O modelo termo-hidráulico MTRCR-IEA-R1 foi desenvolvido no IPEN-CNEN/SP em 2000 usando o programa comercial Engineering Equation Solver (EES) [17]. Ele consiste de um conjunto de equações de balanço de fluxo de calor, correlações para cálculo do coeficiente de película, número de Reynolds, número de Prandtl e condições de contorno que são resolvidas simultaneamente. O uso desse modelo computacional permite uma análise termo-hidráulica de reatores de pesquisa com elementos combustíveis MTR. Os seguintes parâmetros são calculados ao longo dos canais dos elementos combustíveis: temperatura no centro do combustível T_c , temperatura no revestimento T_r , temperatura no fluido refrigerante T_f , temperatura para início de ebulição nucleada (“Onset of Nucleate Boiling” - ONB) T_{onb} , fluxo crítico de calor (Departure of Nucleate Boiling-DNB), instabilidade do fluxo e as margens de segurança termo-hidráulicos MDNBR e FIR. As margens de

segurança termo-hidráulicos MDNBR e FIR são calculadas como a relação entre, respectivamente, o fluxo de calor crítico e o fluxo de calor para instabilidade do fluxo, e o fluxo de calor local. Além disso, o modelo MTRCR-IEA-R1 também utiliza no cálculo as incertezas envolvidas no cálculo termo-hidráulico, por exemplo, incertezas de fabricação do combustível, erro no cálculo de distribuição de densidade de potência, na distribuição de vazão no núcleo e nas margens de segurança para os coeficientes de transferência de calor. O cálculo dos parâmetros térmicos e hidráulicos são comparados com os limites de projeto estabelecidos para combustíveis MTR no item 4.2.2

A inserção do DIM na placa matriz do núcleo deve atender aos critérios de projeto estabelecidos para os parâmetros termo-hidráulicos. Para esta avaliação, um estudo paramétrico foi desenvolvido com programa MTRCR-IEA-R1 para cada uma das posições de irradiação (26, 36 e 37) da placa matriz do núcleo do reator IEA-R1 disponíveis para a colocação do DIM. Foi avaliado neste estudo a vazão mínima necessária para resfriar as miniplacas combustíveis dentro do DIM. Para o estudo, foram analisadas vazões entre 5,0 e 15,0 m^3/s . A escolha dessas vazões deve-se ao fato de que a vazão por elemento combustível padrão no núcleo do reator IEA-R1 é de $\sim 21,0 m^3/s$, sendo esta vazão suficiente para refrigerar os elementos combustíveis que possuem uma potência média de $\sim 2,08 \times 10^5 W$ para uma potência de operação do reator de 5 MW. Comparando a potência média e vazão por elemento combustível padrão com as mesmas do DIM, que na situação mais crítica (reator operando a 5,0 MW e o mesmo com 10 miniplacas de U_3Si_2-Al com densidade de $4,8 g/cm^3$) possui potência média de $\sim 1,5 \times 10^4 W$, adotou-se para o estudo paramétrico com o programa MTRCR-IEA-R1 vazões entre 5,0 e 15,0 m^3/s .

As curvas de densidades de potência geradas com o programa CITATION (Tabs. 4.3, 4.4 e 4.5) foram utilizadas como parte dos dados de entrada do MTRCR-IEA-R1. O Apêndice C apresenta o programa fonte do MTRCR-IEA-R1 adaptado. As adaptações foram necessárias devido ao estojo, onde são acopladas as miniplacas no interior do DIM, possuir um número de canais (9) diferente de um EC padrão do reator IEA-R1 que possui 18 canais.

As Tabs. (4.6), (4.7) e (4.8) apresentam as densidades de potência em cada posição $\mathbf{r}$ na altura z dos canais de refrigeração. A análise foi feita para duas regiões diferentes ao longo do eixo x . As miniplacas foram divididas em 10 mechas. O volume para cálculo da

potência é $123,192 \text{ cm}^3$.

Tabela 4.6 - Densidade de Potência (W/cm^3) - U_3Si_2 - $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Posição 26.

Mechas	z(cm)	Região 1	Região 2
1	0,00	70,880	94,016
2	1,18	65,780	89,227
3	2,36	63,504	86,873
4	3,54	62,247	85,419
5	4,72	61,419	84,365
6	5,90	60,825	83,535
7	7,08	60,456	82,918
8	8,26	60,482	82,666
9	9,44	61,427	83,225
10	10,62	64,909	85,966

Tabela 4.7 - Densidade de Potência (W/cm^3) - U_3Si_2 - $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Posição 36.

Mechas	z(cm)	Região 1	Região 2
1	0,00	115,620	119,300
2	1,18	106,970	111,850
3	2,36	102,990	108,150
4	3,54	100,750	105,950
5	4,72	99,295	104,470
6	5,90	98,300	103,420
7	7,08	97,743	102,780
8	8,26	97,894	102,790
9	9,44	99,593	104,120
10	10,62	105,410	108,760

A Tab. (4.9) apresenta um resumo das variáveis de entrada do programa MTRCR-IEA-R1: potência dissipada nas miniplacas, variação de vazão adotada, fator de erro na vazão, temperatura de saturação do fluido refrigerante, temperatura do fluido refrigerante na entrada do núcleo, número total de miniplacas, fatores de incerteza e pressão de operação (entrada do núcleo).

Tabela 4.8 - Densidade de Potência (W/cm^3) - U_3Si_2 - 4,8 gU/cm^3 . Posição 37.

Mechas	z(cm)	Região 1	Região 2
1	0,00	104,620	107,150
2	1,18	96,989	100,620
3	2,36	93,424	97,342
4	3,54	91,397	95,368
5	4,72	90,072	94,026
6	5,90	89,159	93,068
7	7,08	88,638	92,477
8	8,26	88,749	92,454
9	9,44	90,223	93,585
10	10,62	95,290	97,584

Tabela 4.9 - Variáveis de entrada para os cálculos térmicos e termo-hidráulicos com o programa MTRCR-IEA-R1.

Potência Dissipada nas Miniplacas (W) na Posição 26	11582,019
Potência Dissipada nas Miniplacas (W) na Posição 36	14696,805
Potência Dissipada nas Miniplacas (W) na Posição 37	13200,022
Variação de Vazão (m^3/s) nas Posições 26, 36 e 37	5 a 15
Fator de Erro na Vazão	1
Temperatura de Saturação ($^{\circ}C$)	114
Temperatura de Entrada do Refrigerante ($^{\circ}C$)	42
Número Total de Miniplacas	10
Fatores de Incerteza	1,522
Pressão de Operação do Reator IEA-R1 (Bar)	1,6

A Tab. (4.10) apresenta os principais dados geométricos relativos ao DIM que também foram usados como parte dos dados de entrada do MTRCR-IEA-R1.

Tabela 4.10 - Dados geométricos do DIM.

Largura do Canal de Refrigeração (mm)	47
Largura Ativa da Miniplaca (mm)	40
Espessura do Canal (mm)	3,7
Espessura da Miniplaca Combustível (mm)	1,52
Espessura do Cerne da Miniplaca Combustível (mm)	0,76
Espessura do Revestimento (mm)	0,38
Altura Total do Canal (mm)	714,4
Número de Canais	9

Com os dados das Tabs. (4.6), (4.7) e (4.8) foi possível obter as curvas de temperatura e vazão (Figs. 4.1 a 4.9) com o código MTRCR-IEA-R1 e avaliar cada um dos parâmetros de segurança termo-hidráulicos em cada uma das posições de irradiação.

Das Figs. (4.1), (4.2) e (4.3) pode-se concluir que as temperaturas mais altas atingidas encontram-se na posição 36 de irradiação, devido ao fato de que nessa posição se tem a mais alta densidade de potência (Tab. (4.7)) em consequência de sua maior proximidade com o centro do núcleo. Assim, a vazão mínima necessária para não se atingir 95°C (temperatura para qual a probabilidade de corrosão no revestimento é alta) é de $\sim 9 \text{ m}^3/\text{h}$.

Analisando as Figs (4.4), (4.5) e (4.6) concluímos que os parâmetros FIR e MDNBR assumem valores aproximadamente iguais para todas as vazões analisadas nas três posições de irradiação. Também, pode ser observado que a Velocidade Crítica de Escoamento assume o mesmo valor para todas as posições. Isso se dá conforme a Eq. (4.25) que nos mostra a não dependência da Velocidade Crítica com o fluxo de calor.

De acordo com as Figs. (4.7), (4.8) e (4.9) podemos observar que o parâmetro ONB assume valores aproximadamente iguais para todas as vazões analisadas nas três posições. Isso se dá conforme a Eq. (4.26) que nos mostra a não dependência do ONB com o a vazão.

Figura 4.1: Temperaturas obtidas nas miniplacas do DIM em função da variação de vazão no mesmo. Posição 26.

Figura 4.2: Temperaturas obtidas nas miniplacas do DIM em função da variação de vazão no mesmo. Posição 36.

Figura 4.3: Temperaturas obtidas nas miniplacas do DIM em função da variação de vazão no mesmo. Posição 37.

Figura 4.4: Variação dos critérios de projeto termo-hidráulicos em função da variação de vazão no DIM. Posição 26.

Figura 4.5: Variação dos critérios de projeto termo-hidráulicos em função da variação de vazão no DIM. Posição 36.

Figura 4.6: Variação dos critérios de projeto termo-hidráulicos em função da variação de vazão no DIM. Posição 37.

Figura 4.7: Temperatura para início de ONB. Posição 26.

Figura 4.8: Temperatura para início de ONB. Posição 36.

Figura 4.9: Temperatura para início de ONB. Posição 37.

4.2.4 Aumento da Eficiência de Transferência de Calor do DIM

O DIM foi projetado e construído antes desta dissertação ser desenvolvida, de forma que um estudo paramétrico foi desenvolvido com o MTRCR-IEA-R1 para avaliar a eficiência da transferência de calor do mesmo. Para este estudo, foi variada a espessura dos canais de refrigeração do DIM para acompanhar o comportamento dos seguintes parâmetros:

- temperaturas nas miniplacas combustíveis;
- velocidade do fluido refrigerante; e
- pressão no núcleo do reator.

O estudo mostra que com a diminuição da espessura dos canais de refrigeração há um aumento na eficiência térmica do DIM. Isto ocorre em consequência da diminuição do diâmetro hidráulico dos canais em função da diminuição da espessura dos mesmos e, desta forma, causando um aumento do coeficiente de troca térmica h . A Eq. (4.31) mostra que o coeficiente h é inversamente proporcional ao diâmetro hidráulico dos canais, elucidando, assim, o aumento da eficiência térmica do DIM [17].

$$h = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4}\frac{k}{D_h} \quad (4.31)$$

onde

- Re é o número de Reynolds;
- Pr é o numero de Prandtl;
- k é a condutividade térmica em W/mK ;e
- D_h o diâmetro hidráulico do canal em m .

A Fig. (4.10) apresenta o aumento da eficiência térmica com a diminuição da espessura do canal de refrigeração. Da figura pode-se notar que a temperatura das miniplacas, na posição 36 de irradiação, aumentam consideravelmente a medida que a espessura do canal aumenta.

Figura 4.10: Temperatura nas miniplacas para diferentes espessuras do canal e para uma largura de 3.7 mm do canal de refrigeração.

A Fig. (4.11) mostra o comportamento da velocidade e pressão em função da variação da espessura do canal. Da figura concluímos que a espessura mínima recomendada seria de

0,0015 m, visto que espessuras inferiores elevam a velocidade do fluido refrigerante para valores próximos a velocidade crítica de projeto (8 m/s). A pressão não sofre alteração pois a mesma é constante no núcleo.

Figura 4.11: Variação da velocidade do fluido refrigerante em função da espessura do canal.

4.2.5 Programa FLOW

O programa FLOW foi desenvolvido no IPEN-CNEN-SP em 2000, utilizando as equações descritas na subseção 4.2.1, para facilitar o cálculo da distribuição de vazão no núcleo do Reator Pesquisas IEA-R1 em trocas de configurações. O programa utiliza linguagem FORTRAN 77 para ambiente DOS e Windows [17].

Análise da Vazão do DIM

A introdução do DIM na placa matriz do reator IEA-R1 desviará parte da vazão do fluido refrigerante do núcleo para resfriar as miniplacas combustíveis. A vazão deve ser suficiente para resfriar as miniplacas, mas sem prejudicar a refrigeração dos elementos combustíveis. Um estudo paramétrico foi desenvolvido com o programa FLOW para determinar o quanto de vazão será desviada do núcleo do reator para o DIM e verificar o

impacto desse desvio no mesmo.

O Apêndice D apresenta um dos dados de entrada do programa FLOW utilizado para o cálculo da distribuição de vazão no núcleo do reator IEA-R1.

Primeiro foi calculada a distribuição de vazão no núcleo do reator sem o DIM para a seguinte configuração do núcleo:

- 21 EC, sendo que o Irradiador de Berílio foi considerado um EC para facilitar o cálculo;
- 6 Elementos para Irradiação de Amostras Refrigerados a Água (EIRA); e
- 4 ECT.

A Tab. (4.11) apresenta a distribuição de vazão no núcleo do reator IEA-R1 sem o DIM.

Tabela 4.11 - Distribuição de vazão no núcleo do reator IEA-R1 sem o DIM.

Vazão fornecida pela bomba	772,22 m^3/s
Vazão nos ECs	20,855 m^3/s
Vazão nos EIRAs	11,233 m^3/s
Vazão nos ECTs	19,458 m^3/s

Os cálculos de distribuição de vazão no núcleo do reator foram refeitos com o DIM inserido em uma das posições de irradiação. Neste cálculo, o DIM foi considerado como um EC, por possuir dimensões próximas ao mesmo. O cálculo foi feito para a seguinte configuração:

- 22 Elementos Combustíveis Padrão (EC), sendo que o Irradiador de Berílio foi considerado um EC para facilitar o cálculo;
- 6 Elementos para Irradiação de Amostras Refrigerados a Água (EIRA); e
- 4 Elementos Combustíveis de Controle (ECT).

A Tab. (4.12) apresenta a distribuição de vazão no núcleo do reator IEA-R1 com o DIM inserido em uma das posições de irradiação.

Tabela 4.12 - Distribuição de vazão no núcleo do reator IEA-R1 com o DIM inserido em uma das posições de irradiação.

Vazão fornecida pela bomba	772,22 m^3/s
Vazão no DIM	20,307 m^3/s
Vazão nos ECs	20,307 m^3/s
Vazão nos EIRAs	10,938 m^3/s
Vazão nos ECTs	18,946 m^3/s

Das Tab. (4.11) e (4.12) pode ser observado que a inserção do DIM em uma das posições de irradiação desviará $\sim 2,6\%$ da vazão total fornecida pela bomba ao núcleo do reator IEA-R1. Comparando a vazão mínima necessária ($\sim 9 m^3/h$), calculada com o MTRCR-IEA-R1 para a refrigeração do DIM inserido em qualquer uma das posições de irradiação, pode-se concluir que a vazão de $20,3 m^3/h$ está bem acima do necessário para a refrigeração das miniplacas. Então, para evitar o desvio desnecessário de fluido refrigerante do núcleo e garantir uma vazão através do DIM que atenda a todos os limites de projeto da miniplacas, foi projetada uma Placa Limitadora de Vazão (PLV) que permite uma vazão no DIM de $\sim 13 m^3/h$. A vazão através do DIM permitida pela PLV desviará $\sim 1,4\%$ da vazão total fornecida pela bomba ao núcleo, evitando assim o desvio desnecessário de fluido refrigerante do mesmo. A PLV também garantirá uma vazão acima da necessária para a refrigeração segura das miniplacas para qualquer posição de irradiação.

4.3 Análise de Segurança do DIM

Uma avaliação do Relatório de Análise de Segurança (RAS) [24] do reator IEA-R1, onde estão descritos os transientes e acidentes postulados para este reator, mostra que os acidentes de perda de refrigerante podem conduzir ao esvaziamento da piscina do reator e ao descobrimento do núcleo e, conseqüentemente, das miniplacas alojadas no DIM. Nesta situação postulada extrema, o Sistema de Resfriamento de Emergência do Reator (SRER) irá remolhar o núcleo evitando a fusão do combustível devido ao calor de decaimento dos produtos de fissão. Este sistema, entretanto, está limitado a remolhar apenas o núcleo e, conseqüentemente, no caso da perda de água do reator pode ocorrer a fusão das miniplacas do DIM que não são atingidas pelo SRER. Assim, houve a necessidade de se avaliar as

temperaturas atingidas nas miniplacas combustíveis do DIM, quando se considera a perda de água da piscina do reator.

De acordo com o RAS do IEA-R1, Acidentes de Perda de Refrigerante (APR) podem ocorrer em reatores de pesquisa tipo piscina pelos seguintes eventos iniciadores:

- Ruptura da Fronteira do Primário;
- Danos da Piscina;
- Esvaziamento da Piscina; e
- Falhas nos Tubos de Irradiação ou nas outras Penetrações.

4.3.1 Metodologia de Análise dos APR

Para a análise dos Acidentes de Perda de Refrigerante foram desenvolvidos os programas LOSS [25] que calcula o tempo de esvaziamento da piscina e o TEMPLOCA [25] que calcula as temperaturas máximas do combustível durante os transientes.

O LOSS resolve a equação da energia para um volume de controle compreendido entre a piscina e a ruptura na tubulação e fornece como resultados o nível de água na piscina, a vazão volumétrica do esvaziamento e a velocidade da água na ruptura para cada intervalo de tempo especificado.

Para o cálculo da temperatura das placas de combustível foi utilizado no TEMPLOCA o mesmo modelo utilizado na análise de segurança do Reator Omega West que tem como base resultados experimentais dos reatores Oak Ridge Reactor (ORR) [26] e Low Intensity Testing Reactor (LITR) [27] que considera o núcleo do reator (ou um elemento combustível) sem água, e consiste em um balanço de energia nas placas, onde são considerados os termos de armazenamento de energia, potência de decaimento, a transferência de calor das placas por convecção natural para o ar, a condução de calor nas estruturas e a transferência de calor do núcleo para ambiente por radiação.

4.4 LOSS

O modelo computacional LOSS foi desenvolvido no IPEN-CNEN-SP para a análise de acidentes postulados de perda de refrigerante (APR) no Reator de Pesquisas IEA-R1. O

programa utiliza linguagem FORTRAN 77 para ambiente DOS e Windows. O tempo de esvaziamento da piscina é calculado resolvendo a Eq. (4.32) para um volume de controle compreendido entre a piscina e a ruptura na tubulação [28],

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 V_1^2 + gz_1 \right) = \left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 V_2^2 + gz_2 \right) + (u_2 - u_1) - \frac{\delta Q}{\delta m} \quad (4.32)$$

sendo,

- p a pressão estática em Pa ;
- ρ a densidade do fluido refrigerante em kg/m^3 ;
- V a velocidade média do fluido refrigerante em m/s ;
- α o coeficiente de fluxo de energia cinética ($\alpha_2 = 1$);
- u a energia interna específica em J/kg ;
- $\frac{\delta Q}{\delta m}$ é a perda de energia via transferência de calor em J/kg ; e
- o termo $\left[(u_2 - u_1) - \left(\frac{\delta Q}{\delta m} \right) \right]$ é a perda de carga total h_{lT} .

Admitindo-se $V_1 = 0$, as pressões $p_1 = p_2$, um nível de água variável da piscina h_{ap} e uma altura h entre a superfície da piscina e o ponto de ruptura (ou abertura) temos:

$$h - \frac{V_2^2}{2g} = h_{lT}. \quad (4.33)$$

Sendo

$$Q_v = A_2 V_2 \quad (4.34)$$

substituindo a Eq. (4.34) na Eq. (4.33) tem-se:

$$h - \frac{Q_v^2}{2A_2^2 g} = k_i \frac{Q_v^2}{2A_i^2 g} + k_{i+1} \frac{Q_v^2}{2A_{i+1}^2 g} + \dots + k_{i+n} \frac{Q_v^2}{2A_{i+n}^2 g} \quad (4.35)$$

isolando Q_v obtém-se:

$$Q_v = \sqrt{\frac{2gh}{\frac{K_i}{A_i^2} + \frac{K_{i+1}}{A_{i+1}^2} + \dots + \frac{K_{i+n}}{A_{i+n}^2} + \frac{1}{A_2^2}}} \quad (4.36)$$

onde

- Q_v é a vazão volumétrica em m^3/s ;
- A_i as áreas transversais nas seções i em m^2 ;
- K_i os coeficientes de perda singular nas seções i ;
- g a aceleração da gravidade em m/s^2 ; e
- h a altura da piscina em m .

Sendo a variação da massa de água em função do tempo

$$\frac{\delta M}{\delta t} = -\rho Q_v \quad (4.37)$$

e

$$M = \rho A_{pis} h_{ap}, \quad (4.38)$$

onde

- M é a massa total de água na piscina em kg ;
- ρ é a densidade da água em kg/m^3 ; e
- A_{pis} é a área da seção transversal da piscina em m^2 ;

obtém-se

$$h_{ap} = h_{ap}(t - \Delta t) - \Delta t \frac{Q_v}{A_{pis}}, \quad (4.39)$$

onde Δt é o incremento de tempo em segundos, substituindo a Eq. (4.38) na Eq. (4.37) e aproximando a derivada temporal por uma diferença regressiva e rearranjando.

O Apêndice E apresenta o programa fonte do LOSS. A Tab. (4.13) apresenta a relação dos dados de entrada do programa LOSS.

Tabela 4.13 - Relação dos dados de entrada do programa LOSS.

Identificação do dado de entrada	Descrição do dado de entrada
NAC=1	Ruptura do tubos do Sistemas Pneumático de Irradiação (SPI).

Continua na próxima página. . .

Tabela 4.13 - Relação dos dados de entrada do programa LOSS.

Identificação do dado de entrada	Descrição do dado de entrada
NAC=2	Falha nos drenos da piscina.
NAC=3	Ruptura da fronteira do Circuito Primário.
NAC=4	Abertura do drenos do Sistema de Retratamento de Água (SRA).
NAC=5	Falha no tubos colimadores.
DT	Incremento de tempo (s) para o cálculo do transiente. Valores adotados: 1 e 2 s.
TMAX	Tempo máximo do transiente. O tempo máximo do transiente varia com caso analisado.
APIS	Área transversal da piscina (28,737 m ²).
H	Coluna inicial de água total (m) (da superfície da piscina ao porão). Essa altura corresponde à diferença entre o nível de água na superfície da piscina e o nível no local de abertura.
	Somente utilizado se NAC=1, 2, 3 ou 4.
HAP	Coluna inicial de água na piscina (m). Essa altura corresponde à coluna d'água do fundo a superfície da piscina (8,8 m).
FCV	Fator de correção do volume útil da piscina. Este representa a relação entre o volume total de o volume útil de água da piscina (1,1).
DRUP	Diâmetro da ruptura (m). Corresponde ao diâmetro interno da tubulação no local da ruptura. Somente utilizado se NAC=1, 2, 3 ou 5. Para NAC=1 DRUP=0,0450 m; Para NAC=2 DRUP=0,0525 m; Para NAC=3 DRUP=0,267 m; e Para NAC=5 DRUP=0,2 m;
NT	Número de tubos dos “coelhos” ou colimadores rompidos. Somente utilizado se NAC=1 ou 5. De 2 a 8 tubos dos “coelhos” e de 1 a 12 tubos colimadores.
KCV	Coefficiente de perda de carga nas curvas. Somente utilizado se NAC=2 ou 3. Para NAC=1 KCV=2,85; e Para NAC=2 KCV=0,42;
KRL	Coefficiente de perda de carga no ralo da piscina.

Continua na próxima página...

Tabela 4.13 - Relação dos dados de entrada do programa LOSS.

Identificação do dado de entrada	Descrição do dado de entrada
	Somente utilizado se NAC=2. KRL=1,4.
KBH	Coeficiente de perda carga no tubo de irradiação. Somente utilizado se NAC=5. Adotado conservativamente como 0,0.
HMIN	Altura do tubo de irradiação relativa ao fundo da piscina. Somente utilizado se NAC=5. HMIN=1,591 m.
KDF	Coeficiente de perda de carga no difusor. Somente utilizado se NAC=3. KDF=150.
KVB	Coeficiente de perda de carga na válvula de isolamento. Somente utilizado se NAC=3. KVB=0,1.
KTEE	Coeficiente de perda de carga no “T” do difusor. Somente utilizado se NAC=3. KTEE=1,0.
HDB	Altura de desligamento da bomba por nível de água baixo. Somente utilizado se NAC=3. Altura adotada de 8,4 m.
ADF	Área da seção transversal do difusor. Somente utilizado se NAC=3. ADF=01,667 m ² .
ATUB	Área da seção transversal da tubulação na ruptura. Somente utilizado se NAC=3. ATUB=0,056 m ² .

4.4.1 Análise de APR no Reator de Pesquisas IEA-R1

Para se realizar qualquer experimento no Reator de Pesquisas IEA-R1 é necessário antes analisar qual a influência do mesmo sobre a segurança operacional do reator em caso de acidentes. Foi feita uma análise de segurança de acordo com o RAS dos possíveis acidentes e quais as consequências o DIM traria para a segurança do reator. Em todos os casos analisados, o DIM não constitui risco algum para a segurança do reator, exceto no caso de um APR.

Em caso de APR, o reator IEA-R1 possui sistemas de segurança que interrompem a reação em cadeia inserindo barras de controle. Entretanto, mesmo com o desligamento

do reator, calor continua a ser produzido pelo decaimento dos produtos de fissão. Para assegurar a integridade física dos elementos combustíveis que compõem o núcleo do reator em caso de um APR, foi desenvolvido um SRER que é acionado no caso de descobrimento parcial ou total do núcleo. O SRER garante que os elementos combustíveis não irão fundir por falta de refrigeração. O SRER possui alcance restrito apenas ao núcleo do reator, não refrigerando as posições de irradiação. O DIM ficará em uma dessas posições e, em caso de perda do fluido refrigerante, as miniplacas ficariam sem refrigeração forçada.

Estudos foram realizados para avaliar os possíveis eventos postulados de perda de refrigerante que poderiam levar a um esvaziamento da piscina do reator e cinco foram selecionados como os mais críticos:

- Ruptura dos Tubos do Sistema Pneumático de Irradiação (SPI);
- Falha nos Drenos da Piscina - Ruptura dos Tubos de Acesso ao Sistema de Retratamento de Água (SRA);
- Ruptura da Fronteira do Circuito Primário do IEA-R1;
- Abertura Indevida dos Drenos do SRA; e
- Falha nos Tubos Colimadores (BH-3).

4.4.2 Ruptura dos Tubos do Sistema Pneumático de Irradiação (SPI)

O SPI é composto por oito tubos de aço inoxidável que penetram o interior da piscina pela parte inferior do piso e se estendem até meia altura da parte lateral do núcleo do reator de forma que quatro tubos ficam dispostos de um lado do núcleo e os outros quatro do lado oposto. Na parte externa à piscina, o SPI conta com tubos plásticos não estanques. O sistema é usado para irradiação de amostras (“coelhos”) e o evento postulado de perda de refrigerante seria devido ao rompimento dos tubos de aço inoxidável no interior da piscina que se daria por uma ruptura em guilhotina nos tubos de SPI em consequência de um forte impacto externo. Falhas nos tubos ou nas soldas podem ser identificadas através da manutenção normal do reator ou por umedecimento das amostras irradiadas diminuindo assim a probabilidade de ocorrência desse acidente [29].

A Tab. (4.14) apresenta os dados de entrada para o caso de um APR por Ruptura dos Tubos do Sistema Pneumático de Irradiação.

Tabela 4.14 - Relação dos dados de entrada do programa LOSS para o caso de Ruptura dos Tubos do Sistema Pneumático de Irradiação (SPI).

Identificação do dado de entrada	Opção ou valor do dado de entrada
NAC	1
DT	1,0
TMAX	10000,0
APIS	28,737
H	11,5
HAP	8,8
FCV	1,1
DRUP	0,045
NT	4

A Fig. (4.12) mostra a variação do nível de água da piscina em função do tempo, calculada com o programa LOSS para um acidente devido ao rompimento dos tubos de aço inoxidável no interior da piscina por uma ruptura em guilhotina nos tubos de SPI. Da figura nota-se que o tempo para o esvaziamento completo do piscina seria de 1 horas 16 e minutos.

4.4.3 Falha nos Drenos da Piscina - Ruptura dos Tubos de Acesso SRA

As duas saídas de drenos existentes na piscina, localizadas respectivamente no compartimento do reator e no compartimento de estocagem, são ligadas ao SRA por tubulações de aço inoxidável. A saída de dreno do compartimento do reator fica isolada por uma válvula gaveta localizada no porão. A saída de dreno do compartimento de estocagem permanece aberta e acoplada a uma mangueira com um coletor de água com bóia que possuem o seu curso limitado por um cabo de aço de 8,7 metros [29].

Dois casos de acidentes podem ser considerados:

1. A ruptura da tubulação de dreno à jusante da união das duas tubulações dos drenos que causaria um vazamento de água da piscina até o travamento da bóia de aspiração

Figura 4.12: Tempo de esvaziamento da piscina do reator devido à Ruptura dos Tubos do Sistema Pneumático de Irradiação (SPI).

e posterior fechamento da válvula de isolamento do dreno do compartimento de estocagem; e

2. O caso mais crítico se daria com o desprendimento do volante de inércia da bomba e consequente choque com a tubulação levando a ruptura da mesma a montante da válvula de isolamento de dreno do compartimento do reator, onde se teria o esvaziamento incontrollável da água da piscina.

A Tab. (4.15) apresenta os dados de entrada para o caso de um APR por Ruptura dos Tubos de Acesso SRA.

A Fig. (4.13) mostra a variação do nível de água da piscina em função do tempo, calculada com o programa LOSS para um acidente com o desprendimento do volante de inércia da bomba e consequente ruptura da tubulação de acesso ao SRA. Da figura nota-se que o tempo para o esvaziamento completo do piscina seria de 3 horas e 54 minutos.

4.4.4 Ruptura da Fronteira do Circuito Primário do IEA-R1

O circuito primário é composto pela tubulação de retorno do refrigerante primário que fica próxima à piscina. Ele opera a baixas pressões e temperaturas de forma que um a

Tabela 4.15 - Relação dos dados de entrada do programa LOSS para o caso de Falha nos Drenos da Piscina - Ruptura dos Tubos de Acesso SRA.

Identificação do dado de entrada	Opção ou valor do dado de entrada
NAC	2
DT	1,0
TMAX	20000,0
APIS	28,737
H	11,5
HAP	8,8
FCV	1,1
DRUP	0,0525
KCV	2,85
KRL	1,4

Figura 4.13: Tempo de esvaziamento da piscina do reator devido à Falha nos Drenos da Piscina - Ruptura dos Tubos de Acesso SRA.

ruptura tipo guilhotina de sua tubulação se daria apenas por um forte impacto externo. Como a probabilidade de ocorrências de terremotos ou a queda de aviões são muito baixas, então a causa mais provável de ruptura do circuito primário seria o desprendimento do volante de inércia das bombas do primário.

O circuito primário conta com duas válvulas de isolamento manuais, localizadas no porão do prédio, respectivamente à entrada e à saída da piscina.

A Tab. (4.16) apresenta os dados de entrada para o caso de um APR por Ruptura da Fronteira do Circuito Primário do IEA-R1.

Tabela 4.16 - Relação dos dados de entrada do programa LOSS para o caso de Ruptura da Fronteira do Circuito Primário do IEA-R1.

Identificação do dado de entrada	Opção ou valor do dado de entrada
NAC	3
DT	1,0
TMAX	500,0
APIS	28,737
H	11,5
HAP	8,8
FCV	1,1
DRUP	0,267
KCV	0,42
KDF	150,0
KVB	0,1
KTEE	1,0
HDB	8,4
ADF	1,667
ATUB	0,056

A Fig. (4.14) mostra a variação do nível de água da piscina em função do tempo, calculada com o programa LOSS para um acidente com o desprendimento do volante de inércia da bomba e consequente ruptura do Circuito Primário. Da figura nota-se que o tempo para o esvaziamento completo da piscina será de 7,5 minutos. Observe que as válvulas serão ineficazes nesse caso, devido ao rápido esvaziamento da piscina e à localização das mesmas em região próxima à ruptura.

4.4.5 Abertura Indevida dos Drenos do SRA

O SRA é composto por dois circuitos de tratamento, sendo que cada um deles conta com seis válvulas de dreno. A abertura indevida dos drenos do SRA se daria por sabo-

Figura 4.14: Tempo de esvaziamento da piscina do reator devido à Ruptura da Fronteira do Circuito Primário do IEA-R1.

tagem, cuja probabilidade é baixa, devido aos procedimentos e dispositivos de segurança da instalação, que restringem o acesso de pessoas estranhas ao prédio do reator e até mesmo dos operadores ao porão onde se localizam os drenos.

A Divisão de Análise de Segurança solicitou duas medidas de segurança para evitar o esvaziamento acidental da piscina pelos drenos, que foram adotadas pelo CRPq do IPEN-CNEN/SP. Foi estabelecido:

1. O travamento da válvula de isolamento do SRA com um cadeado; e
2. O travamento da bóia da mangueira de coleta de água da piscina através de um cabo de aço com 8,7 metros.

A Tab. (4.17) apresenta os dados de entrada para o caso de um APR por Abertura Indevida dos Drenos do SRA.

A Fig. (4.15) mostra a variação do nível de água da piscina em função do tempo, calculada com o programa LOSS para a abertura indevida dos drenos do SRA. Da figura nota-se que o tempo para o esvaziamento completo da piscina seria de 13 horas e 54 minutos.

Tabela 4.17 - Relação dos dados de entrada do programa LOSS para o caso de Abertura Indevida dos Drenos do SRA.

Identificação do dado de entrada	Opção ou valor do dado de entrada
NAC	4
DT	2,0
TMAX	50000,0
APIS	28,737
H	11,5
HAP	8,8
FCV	1,1

Figura 4.15: Tempo de esvaziamento da piscina do reator devido à Abertura Indevida dos Drenos do SRA.

4.4.6 Falha nos Tubos Colimadores (BH-3)

O reator IEA-R1 possui onze tubos de alumínio (“beam holes”) para a realização de experimentos. Os tubos atravessam horizontalmente as paredes de concreto da piscina em doze pontos. Os tubos estão posicionados em alturas diferentes relativamente ao núcleo do reator de forma que apenas o rompimento do BH-3 descobriria a parte ativa das miniplcas. Caso ocorra o rompimento dos demais BHs o nível de água da piscina permaneceria acima

da parte ativa das miniplacas, o que garante a refrigeração forçada pela bomba principal.

A Tab. (4.18) apresenta os dados de entrada para o caso de um APR por Falha nos Tubos Colimadores (BH-3).

Tabela 4.18 - Relação dos dados de entrada do programa LOSS para o caso de Falha nos Tubos Colimadores (BH-3).

Identificação do dado de entrada	Opção ou valor do dado de entrada
NAC	5
DT	2,0
TMAX	20000,0
APIS	28,737
HAP	8,8
FCV	1,1
DRUP	0,2
NT	1
KBH	0,0
HMIN	1,591

A Fig. (4.16) mostra a variação do nível de água da piscina em função do tempo, calculada com o programa LOSS, para o rompimento do tubo BH-3. Da figura, nota-se que o tempo para o esvaziamento da piscina até o nível do BH-3 (altura menos o diâmetro interno do tubo) seria de 23 minutos.

Dos cinco acidentes possíveis, verificou-se que a Ruptura da Fronteira do Primário é o mais crítico, a Fig. (4.14) mostra que são necessários aproximadamente 7,5 *min* para que a piscina esteja completamente esvaziada no caso de ocorrer um acidente postulado de Ruptura de Tubulação no Circuito Primário.

4.4.7 TEMPLOCA

O IPEN-CNEN/SP desenvolveu o modelo computacional TEMPLOCA para cálculo das temperaturas máximas atingidas em combustíveis devido à produção de calor por decaimento dos produtos de fissão quando de uma perda completa de fluido refrigerante no núcleo do Reator de Pesquisas IEA-R1. O programa TEMPLOCA utiliza linguagem FORTRAN 77 para ambiente DOS e Windows.

Figura 4.16: Tempo de esvaziamento da piscina do reator devido à Falha nos Tubos Colimadores (BH-3).

Um reator nuclear, mesmo após seu desligamento, continua a produzir energia em consequência do decaimento dos produtos de fissão e radionuclídeos. Esta energia é diretamente proporcional à potência do reator, ao tempo de operação do mesmo e as características do combustível usado, como densidade e enriquecimento de urânio. Com o descobrimento do núcleo em consequência de um APR, o calor de decaimento dos produtos de fissão tendem a aumentar a temperatura do combustível, enquanto a capacidade térmica dos elementos combustíveis e os mecanismos de transferência de calor por condução, convecção e radiação tendem a reduzir a temperatura no mesmo, de forma que o balanço de energia é expresso como:

$$M c_p \frac{\delta \theta}{\delta t} = Q(t) - U A \theta t \quad (4.40)$$

onde,

- $Q(t)$ é o calor de decaimento em MW;
- M é a massa do combustível em kg;
- c_p é o calor específico do elemento combustível em $MJ/kg^{\circ}C$;
- UA é a condutância térmica global do elemento em $MW/^{\circ}C$ que corresponde ao produto global de transferência de calor U pela área de troca térmica A ; e

- $\theta(t)$ é a diferença de temperatura entre o combustível e o ar em $^{\circ}C$.

Quando,

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = 0 \quad (4.41)$$

a Eq. (4.40) torna-se

$$Q(t) = UA\theta(t). \quad (4.42)$$

A equação para o cálculo da condutância térmica global do combustível [30] é:

$$UA = 1,3 * 10^{-6} \left(6,4 * 10^{-3} \theta^{0,72} + 0,5 \right). \quad (4.43)$$

Substituindo a Eq. (4.43) na Eq. (4.40) obtém-se:

$$Mc_p = Q(t) - \theta \left[1,3 * 10^{-6} \left(6,4 * 10^{-3} \theta^{0,72} + 0,5 \right) \right]. \quad (4.44)$$

A partir da Eq. (4.44), aproximando a derivada temporal por uma diferença regressiva e rearranjando:

$$\theta(t) = \theta(t-1) + \Delta\theta \quad (4.45)$$

$$\theta(t) = \theta(t-1) + \left(Q - \theta(t-1) \left(1,3 * 10^{-6} \left(6,4 * 10^{-3} * \theta(t-1)^{0,72} + 0,5 \right) \right) \right) \left(\frac{\Delta t}{4,2 * 10^{-3}} \right) \quad (4.46)$$

onde $\Delta\theta$ é a variação de temperatura no incremento de tempo Δt que corresponde ao intervalo $(t - (t-1))$.

A temperatura máxima no combustível pode ser obtida da Eq. (4.47).

$$T_{Mf}(t) = \theta(t) + T_{ar} \quad (4.47)$$

onde,

1. T_{Mf} é a temperatura final em $^{\circ}C$; e
2. T_{ar} é a temperatura do ar em $^{\circ}C$.

As curvas de calor de decaimento também podem ser calculadas através da equação de Way-Wigner (Eq. (4.48)) [29].

$$P_N = W \left[t^{-0,2} - (T + t)^{-0,2} \right] \quad (4.48)$$

onde,

- P_N é a potência relativa;
- W é uma constante dependente do material;
- t é tempo de decaimento (s); e
- T é tempo de irradiação (s).

O Apêndice F apresenta o programa fonte do TEMPLOCA. A Tab. (4.19) apresenta a relação dos dados de entrada do programa TEMPLOCA.

Tabela 4.19 - Relação dos dados de entrada do programa TEMPLOCA.

Identificação do dado de entrada	Descrição do dado de entrada
PM	Potência de operação por elemento combustível (MW).
TMAX	Tempo máximo do transiente (s).
TLAG	Tempo entre o desligamento do reator e o descobrimento do núcleo (s).
TFIC	Temperatura do combustível no instante inicial após o descobrimento ($^{\circ}\text{C}$).
TARC	Temperatura inicial do ar após o descobrimento ($^{\circ}\text{C}$).
FR	Fator de potência radial do elemento analisado. FR=1,227.
FS	Fator de incerteza para a potência de decaimento. FS=1,1.
FSP	Fator de sobrepotência. FSP=1,1.
IMCP	Opção de entrada para a massa e o calor específico do elemento combustível. IMCP=1 Utilização do fator de correção FMCP. IMCP=2 Fornecimento das massas do elemento e cálculo do calor específico em função da temperatura (somente para combustíveis do U_3O_8).

Continua na próxima página...

Tabela 4.19 - Relação dos dados de entrada do programa TEMPLOCA.

Identificação do dado de entrada	Descrição do dado de entrada
FMCP	Fator de correção da massa e do calor específico em relação ao valor padrão do elemento combustível de controle do reator LITR. Somente utilizado se IMCP=1. FMCP=1,0.
MAL	Massa de alumínio do elemento combustível (kg). Somente utilizado se IMCP=2.
MFU	Massa da dispersão de U_3O_8 -Al. Somente utilizado se IMCP=2.
WU	Fração em peso de urânio na dispersão. Somente utilizado se IMCP=2.
ICDEC	Opção para escolha da curva de decaimento. Equação de Way-Wigner ICDEC=1. Equação de decaimento exponencial ICDEC=2.
TO	Tempo de operação (ou irradiação) do reator anterior ao seu desligamento (s).
W	Constante dependente do material do combustível. Somente utilizado se ICDEC=1.
A0, A1, A2, A3, K0, K1, k2 e k3	Coefficientes da equação de decaimento exponencial. Somente utilizado se ICDEC=2.

4.4.8 Temperatura nas Mini-placas Após um APR

Caso ocorra um APR no reator IEA-R1, as posições de irradiação ficariam, consequentemente, sem refrigeração após o descobrimento do núcleo. Das subseções (4.1.1) e (4.2.3) pode-se concluir que a situação mais crítica de transiente após um APR se daria na posição 36 de irradiação. Nesta posição, tem-se a mais alta densidade de potência e, consequentemente, a mais alta produção de calor no DIM com 10 mini-placas combustíveis de U_3Si_2 -Al na densidade de 4,8 gU/cm³ e o reator operando a 120 horas semanais a 5 MW. Após o descobrimento do núcleo é necessário avaliar se as temperaturas atingidas nas mini-placas estão dentro dos limites de projeto.

Dos cinco acidentes analisados com programa LOSS, verificou-se que a Ruptura da Fronteira do Circuito Primário é o mais crítico. A Fig. (4.14) mostra que são necessários aproximadamente 7,5 minutos para que a piscina esvazie completamente. O programa TEMPLOCA foi usado para o cálculo da temperatura máxima atingida nas miniplacas após este transiente.

A Tab. (4.20) apresenta os dados de entrada para o cálculo de temperatura das miniplacas com o TEMPLOCA para as condições acima descritas.

Tabela 4.20 - Dados de entrada para o cálculo de temperatura das miniplacas com o TEMPLOCA.

Identificação do dado de entrada	Opção ou valor do dado de entrada
PM	0,015
TMAX	60000,0
TLAG	324,0
FR	1,227
FS	1,1
FSP	1,1
IMCP	1
FMCP	1,0
TIFC	100,0
TARC	32,0
ICDEC	1
TO	432000,0
W	0,0622

A Fig. (4.17) apresenta a temperatura máxima atingida nas miniplacas, em função do calor proveniente do decaimento dos produtos de fissão, após o APR analisado. Nota-se que a temperatura máxima atingida foi de $\sim 130^{\circ}\text{C}$, bem abaixo da temperatura de empolamento da placa combustível que é considerado como limite térmico do mesmo. Para os combustíveis tipo dispersão analisados nesta dissertação, o limite de projeto adotado é a temperatura de empolamento das miniplacas combustíveis que ocorre entre 475°C a

550 °C. A esta temperatura, ocorre o inchamento da placa devido à expansão dos gases ou produtos de fissão nela contidos, com a consequente obstrução do canal de refrigeração e posterior elevação da temperatura da placa até sua fusão. O valor da temperatura de empolamento varia entre 350 °C e 600 °C, principalmente em função do tipo do combustível utilizado, do grau de enriquecimento e da porcentagem de queima.

Figura 4.17: Temperaturas das mini-placas após descobrimento do núcleo.

4.5 Tempo de Irradiação Para a Qualificação das Mini-placas

A irradiação das mini-placas deverá ocorrer com o reator operando a 5 MW e para um regime de operação de 120 horas semanais e 45 semanas por ano. Atualmente, o reator está operando a 3,5 MW e no regime operacional de 60 horas semanais e 45 semanas por ano. Para estes dois casos foram avaliados o tempo necessário para se atingir queimas nas mini-placas de 50% e 80% de ^{235}U . As Figs. (4.18) e (4.19) apresentam os tempos máximos atingidos para a irradiação a 5 MW, 120 horas semanais e, respectivamente, 50% e 80% de queimas do ^{235}U . Nota-se destas figuras que para uma potência de 5 MW serão necessários aproximadamente 1 ano e 1,25 anos, respectivamente, para atingir queimas de 50% e 80% do U^{235} . Das Figs. (4.20) e (4.21) nota-se que os tempos serão maiores quando a potência for de 3,5 MW.

Figura 4.18: Tempo de irradiação para qualificação das miniplacas na posição 36 para o regime operacional de 120 horas (50% de queima do U^{235}).

Figura 4.19: Tempo de irradiação para qualificação das miniplacas na posição 36 para o regime operacional de 120 horas (80% de queima do U^{235}).

Figura 4.20: Tempo de irradiação para qualificação das miniplacas na posição 36 para o regime operacional de 60 horas (50% de queima do U^{235}).

Figura 4.21: Tempo de irradiação para qualificação das miniplacas na posição 36 para o regime operacional de 60 horas (80% de queima do U^{235}).

Capítulo 5

Conclusões

Para qualificar elementos combustíveis fabricados no IPEN-CNEN/SP de $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ com densidades de até $3,2 \text{ gU/cm}^3$, bem como elementos combustíveis de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ com densidades de até $4,8 \text{ gU/cm}^3$, foi projetado e construído no IPEN um Dispositivo para Irradiação de Miniplacas (DIM). Este dispositivo permite irradiar simultaneamente até dez miniplacas dos combustíveis citados.

Para avaliar o desempenho sob irradiação das miniplacas combustíveis, um conjunto de testes não destrutivos será realizado periodicamente na Piscina de Estocagem dos Combustíveis Irrradiados (PECI) do Reator IEA-R1. Estes testes consistirão na inspeção visual e na medida da espessura das miniplacas ao longo da irradiação.

A medida de espessura das miniplacas combustíveis será realizada pelo Sistema Medidor de Espessura de Miniplacas Combustíveis (SMEMC) que serve para avaliar o inchamento do combustível ao longo da irradiação. O SMEMC foi comissionado dentro e fora da piscina do reator IEA-R1 e os resultados dimensionais obtidos estão de acordo com os padrões fornecidos pelo fabricante (TESA). O equipamento permite medir a espessura das miniplacas com precisão de aproximadamente 0,2%.

Os cálculos neutrônicos realizados com o programas 2DB e CITATION mostram que a inserção do DIM irá inserir uma pequena reatividade negativa no núcleo, de maneira que essa inserção de reatividade deve ser considerada nos cálculos de mudança de configuração. Estes cálculos foram desenvolvidos para o DIM com 10 miniplacas de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$, com densidade de $4,8 \text{ gU/cm}^3$ e o reator operando em sua potência máxima de projeto (5 MW). A melhor posição para a irradiação das miniplacas na placa matriz do reator é a posição 36,

por ter a mesma a densidade de potência mais elevada, visto que se encontra mais próxima do núcleo do reator. A irradiação das miniplacas nesta posição acarretará em um tempo menor para se atingir os níveis de queima desejados para a qualificação do combustível.

Os cálculos termo-hidráulicos realizados, respectivamente, com os programas MTRCR-IEA-R1 e FLOW mostram que a vazão mínima necessária para se refrigerar o DIM em qualquer uma das três posições de irradiação analisadas neste trabalho é de $9 \text{ m}^3/\text{s}$. Uma vazão de $\sim 13,0 \text{ m}^3/\text{s}$ foi escolhida para refrigerar o DIM. Para isso, foi projetada uma Placa Limitadora de Vazão (PLV) que limita a vazão no DIM em $\sim 13,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Para esta vazão, a temperatura máxima atingida nas miniplacas combustíveis foi de $\sim 80,0 \text{ }^\circ\text{C}$ no cerne das mesmas, abaixo dos limites de projeto estipulados. Os dados também mostram que esse fluxo desviado para a refrigeração do DIM não prejudicará a refrigeração do núcleo do reator.

A análise de segurança realizada com o programa LOSS mostra que no caso de um APR por Ruptura da Fronteira do Circuito Primário será necessário aproximadamente $7,5 \text{ min}$ para ocorrer o esvaziamento da piscina do reator. Após este tempo de esvaziamento, a máxima temperatura calculada com o TEMPLOCA, nas miniplacas combustíveis devido ao calor de decaimento é de $\sim 130 \text{ }^\circ\text{C}$ e abaixo dos limites de projeto estipulados.

Caso o reator opere a uma potência de 5 MW e 120 horas semanais, os tempos de irradiação necessários para se atingir queimas de 50% e 80% do ^{235}U nas miniplacas serão, respectivamente, de 1 ano e 1,25 anos.

A inserção do DIM, composto por 10 miniplacas de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$, com densidade de $4,8 \text{ gU/cm}^3$, em qualquer uma das três posições de irradiação (26, 36 e 37) cedidas pelo CRPq, na placa matriz do reator IEA-R1 não causa nenhuma anormalidade à operação do mesmo, de forma que, todos os limites de projeto do reator e das miniplacas são atendidos.

Apêndice A

Programa 2DB

A.1 INPUT

```
** REATOR IEAR1 – CONF. 236 – Tzero c/mod2(Prev) ***
'* Modelagem Heterogenea – elemento c/10 cel's em cada direcao *****
'* Modelagem preparada p/simular EC c/placas laterais a 50% de U235**
'* Configuracao 3.5 Mw – real / EIBE posicao central com 24 EC's ****
'* Introd.de 10 Refletores de Berilio – s.choque (Berilio metalico) *
'* modelagem c/nova numeracao dos Elementos(17–20 ECC's e 21–40 EC's*
'* Revisao Geral da Geometria do Nucleo em 03/2003*****
'* Modificacao 2(deixar a regioa central menos queimada)
'* sai – EC–168,EC–165,EC–170,EC–164
'* entra – EC–177,EC–174,EC–176,EC–175
'* EC–168(64paraSR),EC–190(63para64),EC–196(43para63),EC–177(SRpara43)
'* EC–169(66para67),EC–189(67para66)
'* EC–165(55paraSR),EC–188(46para55),EC–185(47para46),EC–174(Srpara47)
'* EC–170(75paraSR),EC–171(57para75),EC–173(87para57),EC–176(Srpara87)
'* EC–164(83paraSR),EC–175(Srpara83)
```

1\$\$

'=1\$\$ ARRAY INTEGER CONTROL PARAMETERS=====

'	IREGAD	IEVTYP	ISERCH	NGPS	NXDOWN	NXCARD	NXTAPE	IGUESS
	0	1	0	2	1	16	65	0
'	MOUTER	MINNER	IALDIR	IOVLAY	IGEOM	IM	JM	NZONES
	0	0	0	0	0	128	148	90
'	NMAT	NMIXCD	IBCL	IBCR	IBCT	IBCB	NIZDEL	NJZDEL
	81	0	0	0	0	0	0	0

[illegible]

[illegible]

24R1	10R3	10R5	10R33	10R6	10R34	10R6	10R35	5R82	5R5	24R1		
'8												
24R1	10R3	10R5	10R33	10R19	10R34	10R20	10R35	5R82	5R5	24R1		
24R1	10R3	10R5	10R33	10R19	10R34	10R20	10R35	5R82	5R5	24R1		
24R1	10R3	10R5	10R33	10R19	10R34	10R20	10R35	5R82	5R5	24R1		
24R1	10R3	10R5	10R33	10R19	10R34	10R20	10R35	5R82	5R5	24R1		
24R1	10R3	10R5	10R33	10R19	10R34	10R20	10R35	5R82	5R5	24R1		
24R1	10R3	10R5	10R33	10R19	10R34	10R20	10R35	5R82	5R5	24R1		
'9												
24R1	10R3	10R5	10R33	10R6	10R34	10R6	10R35	5R82	5R5	24R1		
'10												
24R1	10R3	10R5	10R65	10R6	10R67	10R6	10R69	5R82	5R5	24R1		
'11												
24R1	10R3	10R5	10R58	10R60	2R4	3R4	3R4	2R4	10R62	10R64	10R5	24R1
'12												
24R1	10R3	10R5	10R29	10R30	2R4	3R4	3R4	2R4	10R31	10R32	10R5	24R1
'13												
24R1	10R3	10R5	10R29	10R30	2R4	3R4	3R2	2R4	10R31	10R32	10R5	24R1
24R1	10R3	10R5	10R29	10R30	2R4	3R4	3R2	2R4	10R31	10R32	10R5	24R1
24R1	10R3	10R5	10R29	10R30	2R4	3R4	3R2	2R4	10R31	10R32	10R5	24R1
'14												
24R1	10R3	10R5	10R29	10R30	2R4	3R2	3R4	2R4	10R31	10R32	10R5	24R1
24R1	10R3	10R5	10R29	10R30	2R4	3R2	3R4	2R4	10R31	10R32	10R5	24R1
24R1	10R3	10R5	10R29	10R30	2R4	3R2	3R4	2R4	10R31	10R32	10R5	24R1
'15												
24R1	10R3	10R5	10R29	10R30	2R4	3R4	3R4	2R4	10R31	10R32	10R5	24R1
'16												
24R1	10R3	10R5	10R57	10R59	2R4	3R4	3R4	2R4	10R61	10R63	10R5	24R1
'17												
24R1	10R3	5R5	5R81	10R52	10R6	10R54	10R6	10R56	5R83	5R5	24R1	
'18												
24R1	10R3	5R5	5R81	10R26	10R6	10R27	10R6	10R28	5R83	5R5	24R1	
'19												
24R1	10R3	5R5	5R81	10R26	10R17	10R27	10R18	10R28	5R83	5R5	24R1	
24R1	10R3	5R5	5R81	10R26	10R17	10R27	10R18	10R28	5R83	5R5	24R1	
24R1	10R3	5R5	5R81	10R26	10R17	10R27	10R18	10R28	5R83	5R5	24R1	
24R1	10R3	5R5	5R81	10R26	10R17	10R27	10R18	10R28	5R83	5R5	24R1	
24R1	10R3	5R5	5R81	10R26	10R17	10R27	10R18	10R28	5R83	5R5	24R1	

[illegible]

[illegible]

24R1	10R1	10R1	10R1	10R1		10R1	10R1	10R1	10R1		24R1	
24R1	10R1	10R1	10R1	10R1		10R1	10R1	10R1	10R1		24R1	
 	

```
'24R1 10R2 10R2 10R5 10R84 10R5 10R85 10R5 10R5 24R1 9Q72
'24R1 10R1 10R1 10R3 10R86 10R3 10R3 10R3 10R3 24R1 9Q72
'24R1 10R1 10R1 10R1 10R1 10R1 10R1 10R1 10R1 24R1 9Q72
'24R1 10R1 10R1 10R1 10R1 10R1 10R1 10R1 10R1 24R1 9Q72
'24R1 10R1 10R1 10R1 10R1 10R1 10R1 10R1 10R1 24R1 23Q72
```

```
6$$$
```

```
'=6$$$ ARRAY IZMAT— MATERIAL NUMBER FOR EACH ZONE=(NZONES)=====
```

```
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
17 18 19 20
21 22 23 24 25
26 27 28
29 30 31 32
33 34 35
36 37 38 39 40
41 42 43 44 45 46 47 48 49 50
51 52 53 54 55 56
57 58 59 60 61 62 63 64
65 66 67 68 69 70
71 72 73 74 75 76 77 78 79 80
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
```

```
7$$$
```

```
'=7$$$ ARRAY MATID—BU—LIBRARY XSEC SET ASSIGNMENTS=(NXTAPE)=====
```

```
'=LEU CORE MATID ARRAY=====
```

```
13 13 13 13
16 16 13 13 16
13 13 16
13 13 13 16
13 16 13
16 13 13 13 16
16 16 16 16 22 22 22 22 16 16
22 22 22 22 16 16
22 22 22 22 22 22 16 16
22 22 16 16 22 22
16 16 22 22 22 22 22 22 16 16
,
' 13 13 13 13
' 13 16 13 13 13
' 13 16 16
```

```

'      13 16      16 13
'      13      16      13
'      13 13 13 13 16
'      22 22      16 16      22 22      22 22      22 22
'      22 22      16 16      16 16
'      22 22      16 16      16 16      22 22
'      22 22      16 16      22 22
'      13 13      22 22      22 22      22 22      16 16
'
'      EC      NOVO
'
'      16
8$$
'=8$$ EDIT REGION  NUMBER == (IEDIT*NZONES) =====
'= PARA IMPRIMIR PARAMETROS HOMOGENEIZADOS +=====
' EDIT 1
'=ZONAS  1  2  3  4  5  6  7  8  9 10 11 12 13 14 15
'      1  2  3  4  5  6  7  8  9 10 11 12 13 14 15
'=ZONAS 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
'      16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
'=ZONAS 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45
'      31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45
'=ZONAS 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60
'      46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60
'=ZONAS 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75
'      61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75
'=ZONAS 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90
'      76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90
9**
'=9** ARRAY FISSION SPECTRUM==(IGM)=====
'      1.0      0.0
13**
'=13** ARRAY CROSS SECTIONS FROM CARDS=====(ITL*NGPS*NXCARD)=====
' **SECOES DE CHOQUE GERADAS POR HAMMER-TECHNION ****
' SF      SA      NSF      STR      SIN      SS
' ——— ZONA 1 — PISCINA ———
'      0.0      4.73173E-04 0.0      2.78439E-01 2.31062E-01 0.0
'      0.0      1.85564E-02 0.0      2.20919E+00 2.19064E+00 4.69038E-02
' ——— ZONA 2 — REFLETOR (CAIXA D'AGUA / IRRADIADOR SI) ———

```

```

0.0          4.49833E-04 0.0          2.62530E-01 2.23260E-01 0.0
0.0          1.72003E-02 0.0          1.72624E+00 1.70904E+00 3.88206E-02
'  ——— ZONA 3 — REFLETOR (GRAFITE) ———
0.0          6.69152E-05 0.0          2.47383E-01 2.45244E-01 0.0
0.0          1.73887E-03 0.0          3.69851E-01 3.68113E-01 2.07255E-03
'  ——— ZONA 4 — IRRADIADOR DE BERILIO ———
0.0          6.86329E-04 0.0          4.53277E-01 4.44983E-01 0.0
0.0          2.00393E-03 0.0          6.50704E-01 6.48700E-01 7.60809E-03
'  ——— ZONA 5 — REFLETOR DE BERILIO ———
0.0          6.46733E-04 0.0          4.96191E-01 0.0 0.0
0.0          9.75944E-04 0.0          6.45181E-01 0.0 6.61568E-03
'  ——— ZONA 6 — GUIA DE CONTROLE ———
0.0          4.39394E-04 0.0          2.58730E-01 2.23261E-01 0.0
0.0          1.61184E-02 0.0          1.55892E+00 1.54281E+00 3.50294E-02
'  ——— ZONA 7 — CANAL PARA AMOSTRAS DE MOO3 ———
0.0          5.64645E-03 0.0          3.00969E-01 2.74511E-01 0.0
0.0          2.25904E-02 0.0          1.08552E+00 1.06293E+00 2.08118E-02
'  ——— ZONA 8 — Material n.8 ———
0.0          4.49833E-04 0.0          2.62530E-01 2.23260E-01 0.0
0.0          1.72003E-02 0.0          1.72624E+00 1.70904E+00 3.88206E-02
'  ——— ZONA 9 — Material n.9 ———
0.0          4.49833E-04 0.0          2.62530E-01 2.23260E-01 0.0
0.0          1.72003E-02 0.0          1.72624E+00 1.70904E+00 3.88206E-02
'  ——— ZONA 10 — Material n.10 ———
0.0          4.49833E-04 0.0          2.62530E-01 2.23260E-01 0.0
0.0          1.72003E-02 0.0          1.72624E+00 1.70904E+00 3.88206E-02
'  ——— ZONA 11 — Material n.11 ———
0.0          4.49833E-04 0.0          2.62530E-01 2.23260E-01 0.0
0.0          1.72003E-02 0.0          1.72624E+00 1.70904E+00 3.88206E-02
'  ——— ZONA 12 — Material n.12 ———
0.0          4.49833E-04 0.0          2.62530E-01 2.23260E-01 0.0
0.0          1.72003E-02 0.0          1.72624E+00 1.70904E+00 3.88206E-02
'  ——— ZONA 13 — Material n.13 ———
0.0          4.49833E-04 0.0          2.62530E-01 2.23260E-01 0.0
0.0          1.72003E-02 0.0          1.72624E+00 1.70904E+00 3.88206E-02
'  ——— ZONA 14 — Material n.14 ———
0.0          4.49833E-04 0.0          2.62530E-01 2.23260E-01 0.0
0.0          1.72003E-02 0.0          1.72624E+00 1.70904E+00 3.88206E-02

```

```

' ----- ZONA 15 - Material n.15 -----
0.0          4.49833E-04  0.0          2.62530E-01  2.23260E-01  0.0
0.0          1.72003E-02  0.0          1.72624E+00  1.70904E+00  3.88206E-02
' ----- ZONA 16 - Material n.16 -----
0.0          4.49833E-04  0.0          2.62530E-01  2.23260E-01  0.0
0.0          1.72003E-02  0.0          1.72624E+00  1.70904E+00  3.88206E-02
15**
'=15** ARRAY BUCKLING MODIFIERS==(NZONES OR NZONES*NGPS)=====
F1.0
17**
'=17** ARRAY BURNUP IN %FISSILE=(NXTAPE)=====T<<<<=
'   DAY   DELT NXTAPE NZONES
' BURNUP FROM
' * CONFIGURACAO 220.- Queima do final de fevereiro (prev) *
      17.717      7.893      7.893      17.733
      0.0      13.692      16.438      15.985      0.0
      12.648              18.914              12.708
      4.960      20.021              20.067      33.453
      16.059              30.080              12.771
      0.0      11.636      15.242      17.228      0.0
      0.0      0.0      14.851 16.829 18.394 18.505 17.223 17.204 0.0 0.0
      11.692 14.284              21.407 23.570              15.467 11.449
      5.347 5.996 21.033 20.336              20.183 20.538 35.185 36.596
      18.397 15.277              29.536 30.840              14.393 11.421
      0.0      0.0      16.025 10.402 18.252 14.030 23.051 15.397 0.0 0.0
'
' * CONFIGURACAO 219.- Queima do final de janeiro (prev) *
'      16.651      6.729      6.730      16.661
'      4.224      12.960      15.561      18.056      15.253
'      11.754              34.103              29.397
'      19.128      32.557              32.590      19.166
'      15.188              33.873              11.866
'      35.633      10.812      14.428      16.451      12.120
'      4.559 5.112 14.027 15.895 17.441 17.542 20.466 22.540 16.452 16.489
'      10.839 13.296              33.613 36.840              28.876 30.127
'      20.119 19.411 34.030 32.655              34.250 35.674 19.285 19.650
'      17.452 14.431              38.221 32.631              13.387 10.635
'      36.241 36.264 14.929 9.670 17.305 13.286 22.043 14.710 14.751 10.922

```

```

,
' * CONFIGURACAO 219.— Queima do final de outubro (real) *
'      13.868      3.694      3.695      13.863
'      2.313      11.062      13.280      15.823      13.351
'      9.426              31.990              27.623
'      16.799      30.296              30.337      16.817
'      12.920              31.778              9.512
'      34.220      8.669      12.312      14.432      10.597
'  2.508  2.810  11.881  13.460  14.945  15.028  18.000  19.837  14.442  14.429
'  8.619  10.715              31.637  34.265              27.159  28.232
' 17.728 16.993 31.553 30.137              31.799 33.257 16.943 17.277
' 14.982 12.225              35.710 30.665              10.762  8.575
' 34.593 35.052 12.056  7.766  14.832 11.350 19.402 12.923 12.894  9.506
,
' * CONFIGURACAO 218.— Queima do final de julho (real) 3a parte  *
' *      de 22/04/2005 ate 30/07/2005 *****
'      10.485      0.0      0.0      10.466
'      0.0      8.776      10.522      13.121      11.057
'      6.610              29.423              25.478
'      13.975      27.545              27.597      13.972
'      10.175              29.235              6.670
'      32.513      6.082      9.759      11.997      8.772
'  0.0    0.0    9.281 10.507 11.897 11.971 14.986 16.525 12.001 11.999
'  5.928  7.576              29.240 31.103              25.085 25.956
' 14.816 14.048 28.523 27.056              28.801 30.302 14.098 14.373
' 11.974  9.550              32.626 28.282              7.572  6.014
' 32.595 33.588  8.541  5.464 11.827  9.008 16.174 10.765 10.660  7.829
,
' * CONFIGURACAO 218.— Queima do final de junho (prev) 3a parte  *
' *      de 22/04/2005 ate 26/05/2005 com modif 5 ***
'      9.734      0.0      0.0      9.702
'      0.0      8.368      9.919      12.533      10.559
'      5.991              28.854              25.007
'      13.346      27.088              27.168      13.336
'      9.708              28.662              6.034
'      31.841      5.503      9.185      11.448      8.361
'  0.0    0.0    8.851 10.023 11.228 11.301 14.327 15.788 11.470 11.448
'  5.369  6.872              28.716 30.381              24.633 25.441

```

```

' 14.162 13.419 28.026 26.620                28.326 29.764 13.467 13.704
' 11.431 9.113                31.915 27.747                6.856 5.434
' 31.875 32.866 7.741 4.946 11.152 8.479 15.444 10.277 10.157 7.444
'
' * CONFIGURACAO 218.— Queima do final de abril (Real) 2a parte *
' *
' * de 01/02/2005 ate 20/04/2005 *****
'
' 7.488 32.854 32.857 7.414
'
' 7.153 25.888 8.118 10.775 9.070
'
' 4.145 27.154 23.600
'
' 11.469 29.822 32.456 11.435
'
' 25.726 26.947 4.134
'
' 8.319 3.776 7.474 9.809 7.136
'
' 7.569 8.581 26.905 28.154 9.220 9.295 12.346 13.572 9.876 9.832
'
' 3.699 4.768 27.147 28.207 23.283 23.995
'
' 12.205 11.541 29.707 30.694 33.847 32.769 11.576 11.769
'
' 26.541 25.321 29.776 26.150 4.711 3.730
'
' 9.813 7.813 5.339 3.399 9.132 6.900 13.251 8.820 8.659 6.393
'
' * CONFIGURACAO 218.— Queima do final da configuracao 217 (Real)*
'
' com modificacao numero 2
'
'
'
' 2.463 28.867 28.803 2.415
'
' 4.505 23.018 4.133 6.919 5.832
'
' 0.0 23.394 20.538
'
' 7.285 25.311 28.141 7.294
'
' 22.728 23.188 0.0
'
' 5.286 0.0 3.755 6.259 4.502
'
' 4.786 5.426 23.687 24.529 4.720 4.844 7.949 8.659 6.380 6.378
'
' 0.0 0.0 23.675 23.355 20.344 20.732
'
' 7.791 7.365 24.817 25.828 29.251 28.121 7.442 7.433
'
' 23.252 22.471 25.019 22.660 0.0 0.0
'
' 6.255 4.972 0.0 0.0 4.709 3.461 8.431 5.660 5.422 4.040
'
' * CONFIGURACAO 218.— Queima do final da configuracao 217 (previsao)*
'
' com modificacao numero 2
'
'
'
' 2.408 28.823 28.760 2.361
'
' 4.476 22.986 4.088 6.876 5.795

```

```

,          0.0          23.353          20.504
,          7.240      25.262          28.094      7.249
,          22.696          23.148          0.0
,          5.253      0.0      3.715      6.221      4.473
,  4.755  5.391  23.651  24.488      4.669  4.794      7.899  8.603      6.340  6.337
,  0.0    0.0          23.636  23.302          20.310  20.695
,  7.743  7.320  24.764  25.775          29.201  28.070      7.396  7.385
, 23.216 22.440          24.967  22.622          0.0    0.0
,  6.216  4.941      0.0      0.0      4.661  3.423      8.378  5.626      5.387  4.013
,
, * CONFIGURACAO 217.— Queima do final da configuracao 216 (real)*
,          com modificacoes numero 4.
,
,          0.0      26.888      26.861      0.0
,          3.247      21.626      2.171      5.008      4.230
,          28.0          21.550          19.037
,          5.295      23.124          26.030      5.297
,          21.314          21.391          29.6
,          3.864      30.8      1.997      4.591      3.276
,  3.457  3.906  22.113  22.758      2.480  2.647      5.743  6.200      4.636  4.672
, 28.0    28.0          21.966  20.963          18.893  19.130
,  5.651  5.378  22.421  23.466          26.972  25.849      5.425  5.313
, 21.691 21.131          22.701  21.002          29.6    29.6
,  4.578  3.645  30.8    30.8      2.602  1.837      6.121  4.180      3.882  2.959
,
, * CONFIGURACAO 217.— Queima do final da configuracao 216 (previsão)*
,          com modificacoes numero 4.
,
,          0.0      26.752      26.727      0.0
,          3.164      21.535      2.039      4.879      4.120
,          28.0          21.452          18.933
,          5.161      23.016          25.885      5.160
,          21.217          21.302          29.6
,          3.766      30.8      1.875      4.475      3.190
,  3.368  3.806  22.009  22.639      2.330  2.486      5.594  6.032      4.515  4.549
, 28.0    28.0          21.857  20.875          18.793  19.017
,  5.509  5.243  22.330  23.350          26.815  25.691      5.285  5.174
, 21.584 21.038          22.580  20.923          29.6    29.6

```



```

, 4.462 3.552 30.8 30.8 2.444 1.725 5.958 4.076 3.780 2.878
,
, * CONFIGURACAO 216.— Queima do final da 1a semana de maio(real)—c/modif*
,
, 34.460 24.909 24.919 34.949
, 2.060 20.310 0.262 3.141 2.636
, 21.574 25.991 17.541
, 3.368 29.252 23.930 3.319
, 19.925 24.673 20.129
, 2.457 20.122 0.238 2.921 2.051
, 2.192 2.481 20.617 21.041 0.302 0.314 3.573 3.764 2.893 2.942
, 21.123 21.794 25.991 25.991 17.449 17.521
, 3.607 3.433 29.252 29.252 24.695 23.542 3.405 3.375
, 20.165 19.808 24.673 24.673 20.393 19.770
, 2.921 2.319 20.960 19.875 0.307 0.221 3.758 2.687 2.428 1.857
,
, * CONFIGURACAO 216.— Queima do final da 1a semana de maio(real)*
,
, 34.460 24.909 24.919 34.949
, 2.060 20.310 0.262 3.141 2.636
, 21.574 30.085 17.541
, 3.368 31.083 23.930 3.319
, 19.925 30.157 20.129
, 2.457 20.122 0.238 2.921 2.051
, 2.192 2.481 20.617 21.041 0.302 0.314 3.573 3.764 2.893 2.942
, 21.123 21.794 29.714 30.871 17.449 17.521
, 3.607 3.433 31.374 31.382 24.695 23.542 3.405 3.375
, 20.165 19.808 30.939 29.773 20.393 19.770
, 2.921 2.319 20.960 19.875 0.307 0.221 3.758 2.687 2.428 1.857
,
, * CONFIGURACAO 215.— Queima do final de Abril (real) — Estudo n03*
,
, 34.223 24.640 24.657 34.712
, 1.898 20.130 0.0 2.889 2.419
, 21.363 29.829 17.338
, 3.108 30.820 23.644 3.051
, 19.737 29.903 19.937
, 2.267 19.951 0.0 2.696 1.886

```

[illegible]

E T

'T

'91\$\$ IBUCON NPRT NOTUSD IXSTRT IDUP17 IRGADJ E 92** E T*****

' * CONFIGURACAO 220.Berilio - Tempo zero com modificacao2 (previsao)

,

/1===== 02/03/06 ==LIGADO - SEGUNDA =====

91\$\$ 1 -1 0 0 0 0 E 92** 0.100 E T

91\$\$ 0 -1 0 0 0 0 E 92** 0.200 E T

,

Apêndice B

Programa CITATION

B.1 INPUT - Posição 36

CITATION – CF236(EIBE) – S/XE – 2 GRUPOS – 3D

c/10 refletores/Be – c/barras/absorvedoras – 2.0 MW –

001

–1 –1

1 0 0 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0

003

0 0 0 0 11

0 0 0 0 0 0 0 1

0.00001

0.0001

5.0

1.000

004

24	24.00	10	7.709	5	3.855	5	3.854	10	7.709	10	7.709
1	1.285	4	2.5695	4	2.5695	1	1.285	3	2.8545	4	2.0
3	2.8545	10	7.709	5	3.854	5	3.855	24	24.00		
24	24.00	10	8.100	10	8.100	10	8.100	2	1.440	3	2.610
3	2.610	2	1.440	1	0.441	8	7.218	1	0.441	1	0.441
1	0.961	6	5.296	1	0.961	1	0.441	1	0.441	4	3.609
4	3.609	1	0.441	1	0.441	1	0.961	6	5.296	1	0.961
1	0.441	1	0.441	8	7.218	1	0.441	10	8.100	24	24.00

12	24.00	3	5.14	20	27.90	2	2.600	10	11.80	2	2.600
11	17.60	3	3.80	3	3.100	10	14.2	6	10.0		

005

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ——— PISCINA ———

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 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 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 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 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 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 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 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 ——— PLACAS DE AL ———

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 3 81 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 1

1 2 2 2 3 82 3 3 3 3 2 2 2 3 3 3 1

1 2 2 2 3 82 3 3 3 3 2 2 2 3 3 3 1

1 2 2 2 3 82 3 3 3 3 2 2 2 3 3 3 1

1 2 2 2 5 82 5 5 5 5 2 2 2 5 5 5 1

1	2	2	2	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	5	5	1
1	2	2	2	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	5	5	1
1	2	2	2	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	5	5	1
1	3	5	84	91	6	91	91	91	91	6	6	6	91	85	5	1
1	3	5	84	91	6	91	91	91	91	6	6	6	91	85	5	1
1	3	5	84	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	85	5	1
1	3	5	84	91	6	91	91	91	91	6	6	6	91	85	5	1
1	3	5	84	91	6	91	91	91	91	6	6	6	91	85	5	1
1	3	5	5	91	91	4	4	4	4	91	91	91	91	5	5	1
1	3	5	5	91	91	4	2	4	4	91	91	91	91	5	5	1
1	3	5	5	91	91	4	4	2	4	91	91	91	91	5	5	1
1	3	5	5	91	91	4	4	4	4	91	91	91	91	5	5	1
1	3	5	5	91	6	91	91	91	91	6	6	6	91	86	5	1
1	3	5	5	91	6	91	91	91	91	6	6	6	91	86	5	1
1	3	5	5	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	86	5	1
1	3	5	5	91	6	91	91	91	91	6	6	6	91	86	5	1
1	3	5	5	91	6	91	91	91	91	6	6	6	91	86	5	1
1	3	5	5	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	5	5	1
1	3	5	5	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	5	5	1
1	3	5	5	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	5	5	1
1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	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	3	81	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	1
1	2	2	2	5	82	5	5	5	5	2	2	2	5	5	5	1
1	2	2	2	41	43	45	45	45	45	47	47	47	49	5	5	1
1	2	2	2	21	22	23	23	23	23	24	24	24	25	5	5	1
1	2	2	2	42	44	46	46	46	46	48	48	48	50	5	5	1
1	3	5	84	51	6	53	53	53	53	6	6	6	55	85	5	1
1	3	5	84	26	6	27	27	27	27	6	6	6	28	85	5	1
1	3	5	84	26	17	27	27	27	27	18	18	18	28	85	5	1
1	3	5	84	26	6	27	27	27	27	6	6	6	28	85	5	1
1	3	5	84	52	6	54	54	54	54	6	6	6	56	85	5	1

—— NUCLEO ATIVO 1 ——

1	3	5	5	57	59	4	4	4	4	61	61	61	63	5	5	1
1	3	5	5	29	30	4	2	4	4	31	31	31	32	5	5	1
1	3	5	5	29	30	4	4	2	4	31	31	31	32	5	5	1
1	3	5	5	58	60	4	4	4	4	62	62	62	64	5	5	1
1	3	5	5	65	6	67	67	67	67	6	6	6	69	86	5	1
1	3	5	5	33	6	34	34	34	34	6	6	6	35	86	5	1
1	3	5	5	33	19	34	34	34	34	20	20	20	35	86	5	1
1	3	5	5	33	6	34	34	34	34	6	6	6	35	86	5	1
1	3	5	5	66	6	68	68	68	68	6	6	6	70	86	5	1
1	3	5	5	71	73	75	75	75	75	77	77	77	79	5	5	1
1	3	5	5	36	37	38	38	38	38	39	39	39	40	5	5	1
1	3	5	5	72	74	76	76	76	76	78	78	78	80	5	5	1
1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	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	3	81	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	97	97	97	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	97	94	97	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	97	94	97	3	3	3	1
1	2	2	2	5	82	5	5	5	5	97	97	97	5	5	5	1
1	2	2	2	41	43	45	45	45	45	47	47	47	49	5	5	1
1	2	2	2	21	22	23	23	23	23	24	24	24	25	5	5	1
1	2	2	2	42	44	46	46	46	46	48	48	48	50	5	5	1
1	3	5	84	51	6	53	53	53	53	6	6	6	55	85	5	1
1	3	5	84	26	6	27	27	27	27	6	6	6	28	85	5	1
1	3	5	84	26	17	27	27	27	27	18	18	18	28	85	5	1
1	3	5	84	26	6	27	27	27	27	6	6	6	28	85	5	1
1	3	5	84	52	6	54	54	54	54	6	6	6	56	85	5	1
1	3	5	5	57	59	4	4	4	4	61	61	61	63	5	5	1
1	3	5	5	29	30	4	2	4	4	31	31	31	32	5	5	1
1	3	5	5	29	30	4	4	2	4	31	31	31	32	5	5	1
1	3	5	5	58	60	4	4	4	4	62	62	62	64	5	5	1
1	3	5	5	65	6	67	67	67	67	6	6	6	69	86	5	1
1	3	5	5	33	6	34	34	34	34	6	6	6	35	86	5	1
1	3	5	5	33	19	34	34	34	34	20	20	20	35	86	5	1
1	3	5	5	33	6	34	34	34	34	6	6	6	35	86	5	1

—— NUCLEO ATIVO 2 ——

1	3	5	5	66	6	68	68	68	68	6	6	6	70	86	5	1	
1	3	5	5	71	73	75	75	75	75	77	77	77	79	5	5	1	
1	3	5	5	36	37	38	38	38	38	39	39	39	40	5	5	1	
1	3	5	5	72	74	76	76	76	76	78	78	78	80	5	5	1	
1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	—— NUCLEO ATIVO 3 ——
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	3	81	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	97	97	97	3	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	97	95	97	3	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	97	96	97	3	3	3	3	1
1	2	2	2	5	82	5	5	5	5	97	97	97	5	5	5	5	1
1	2	2	2	41	43	45	45	45	45	47	47	47	49	5	5	5	1
1	2	2	2	21	22	23	23	23	23	24	24	24	25	5	5	5	1
1	2	2	2	42	44	46	46	46	46	48	48	48	50	5	5	5	1
1	3	5	84	51	6	53	53	53	53	6	6	6	55	85	5	5	1
1	3	5	84	26	6	27	27	27	27	6	6	6	28	85	5	5	1
1	3	5	84	26	17	27	27	27	27	18	18	18	28	85	5	5	1
1	3	5	84	26	6	27	27	27	27	6	6	6	28	85	5	5	1
1	3	5	84	52	6	54	54	54	54	6	6	6	56	85	5	5	1
1	3	5	5	57	59	4	4	4	4	61	61	61	63	5	5	5	1
1	3	5	5	29	30	4	2	4	4	31	31	31	32	5	5	5	1
1	3	5	5	29	30	4	4	2	4	31	31	31	32	5	5	5	1
1	3	5	5	58	60	4	4	4	4	62	62	62	64	5	5	5	1
1	3	5	5	65	6	67	67	67	67	6	6	6	69	86	5	5	1
1	3	5	5	33	6	34	34	34	34	6	6	6	35	86	5	5	1
1	3	5	5	33	19	34	34	34	34	20	20	20	35	86	5	5	1
1	3	5	5	33	6	34	34	34	34	6	6	6	35	86	5	5	1
1	3	5	5	66	6	68	68	68	68	6	6	6	70	86	5	5	1
1	3	5	5	71	73	75	75	75	75	77	77	77	79	5	5	5	1
1	3	5	5	36	37	38	38	38	38	39	39	39	40	5	5	5	1
1	3	5	5	72	74	76	76	76	76	78	78	78	80	5	5	5	1
1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	—— NUCLEO ATIVO 4 ——
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	3	81	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	97	97	97	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	97	94	97	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	97	94	97	3	3	3	1
1	2	2	2	5	82	5	5	5	5	97	97	97	5	5	5	1
1	2	2	2	41	43	45	45	45	45	47	47	47	49	5	5	1
1	2	2	2	21	22	23	23	23	23	24	24	24	25	5	5	1
1	2	2	2	42	44	46	46	46	46	48	48	48	50	5	5	1
1	3	5	84	51	6	53	53	53	53	6	6	6	55	85	5	1
1	3	5	84	26	6	27	27	27	27	6	6	6	28	85	5	1
1	3	5	84	26	17	27	27	27	27	18	18	18	28	85	5	1
1	3	5	84	26	6	27	27	27	27	6	6	6	28	85	5	1
1	3	5	84	52	6	54	54	54	54	6	6	6	56	85	5	1
1	3	5	5	57	59	4	4	4	4	61	61	61	63	5	5	1
1	3	5	5	29	30	4	2	4	4	31	31	31	32	5	5	1
1	3	5	5	29	30	4	4	2	4	31	31	31	32	5	5	1
1	3	5	5	58	60	4	4	4	4	62	62	62	64	5	5	1
1	3	5	5	65	6	67	67	67	67	6	6	6	69	86	5	1
1	3	5	5	33	6	34	34	34	34	6	6	6	35	86	5	1
1	3	5	5	33	19	34	34	34	34	20	20	20	35	86	5	1
1	3	5	5	33	6	34	34	34	34	6	6	6	35	86	5	1
1	3	5	5	66	6	68	68	68	68	6	6	6	70	86	5	1
1	3	5	5	71	73	75	75	75	75	77	77	77	79	5	5	1
1	3	5	5	36	37	38	38	38	38	39	39	39	40	5	5	1
1	3	5	5	72	74	76	76	76	76	78	78	78	80	5	5	1
1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	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	3	81	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	1
1	2	2	2	5	82	5	5	5	5	2	2	2	5	5	5	1
1	2	2	2	41	43	45	45	45	45	47	47	47	49	5	5	1
1	2	2	2	21	22	23	23	23	23	24	24	24	25	5	5	1

— NUCLEO ATIVO 5 —

1	2	2	2	42	44	46	46	46	46	48	48	48	50	5	5	1
1	3	5	84	51	6	53	53	53	53	6	6	6	55	85	5	1
1	3	5	84	26	6	27	27	27	27	6	6	6	28	85	5	1
1	3	5	84	26	17	27	27	27	27	18	18	18	28	85	5	1
1	3	5	84	26	6	27	27	27	27	6	6	6	28	85	5	1
1	3	5	84	52	6	54	54	54	54	6	6	6	56	85	5	1
1	3	5	5	57	59	4	4	4	4	61	61	61	63	5	5	1
1	3	5	5	29	30	4	2	4	4	31	31	31	32	5	5	1
1	3	5	5	29	30	4	4	2	4	31	31	31	32	5	5	1
1	3	5	5	58	60	4	4	4	4	62	62	62	64	5	5	1
1	3	5	5	65	6	67	67	67	67	6	6	6	69	86	5	1
1	3	5	5	33	6	34	34	34	34	6	6	6	35	86	5	1
1	3	5	5	33	19	34	34	34	34	20	20	20	35	86	5	1
1	3	5	5	33	6	34	34	34	34	6	6	6	35	86	5	1
1	3	5	5	66	6	68	68	68	68	6	6	6	70	86	5	1
1	3	5	5	71	73	75	75	75	75	77	77	77	79	5	5	1
1	3	5	5	36	37	38	38	38	38	39	39	39	40	5	5	1
1	3	5	5	72	74	76	76	76	76	78	78	78	80	5	5	1
1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	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	3	81	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	1
1	2	2	2	3	82	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	1
1	2	2	2	5	82	5	5	5	5	2	2	2	5	5	5	1
1	2	2	2	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	5	5	1
1	2	2	2	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	5	5	1
1	2	2	2	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	5	5	1
1	3	5	84	91	6	91	91	91	91	6	6	6	91	85	5	1
1	3	5	84	91	6	91	91	91	91	6	6	6	91	85	5	1
1	3	5	84	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	85	5	1
1	3	5	84	91	6	91	91	91	91	6	6	6	91	85	5	1
1	3	5	84	91	6	91	91	91	91	6	6	6	91	85	5	1
1	3	5	5	91	91	4	4	4	4	91	91	91	91	5	5	1
1	3	5	5	91	91	4	2	4	4	91	91	91	91	5	5	1

— PLACAS DE AL —

[illegible]

006

55 64 75 76 01 22

55 64 83 84 01 22

75 84 95 96 01 22

75 84 103 104 01 22

75 84 75 76 01 23

75 84 83 84 01 23

97

55 64 95 96 01 23

55 64 103 104 01 23

8

2 1 0

1 1 1.19715E+00 4.73173E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 4.69038E-02

1 2 1.50885E-01 1.85564E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00

2 1 1.26970E+00 4.49833E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 3.88206E-02

2 2 1.93098E-01 1.72003E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00

3 1 1.34744E+00 6.69152E-05 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 2.07255E-03

3 2 9.01264E-01 1.73887E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00

4 1 7.35386E-01 6.86329E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 7.60809E-03

4 2 5.12266E-01 2.00393E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00

5 1 6.71784E-01 6.46733E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 6.61568E-03

5 2 5.16651E-01 9.75944E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00

6 1 1.28834E+00 4.39394E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 3.50294E-02

6 2 2.13823E-01 1.61184E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00

7 1 1.10753E+00 5.64645E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 2.08118E-02

7 2 3.07072E-01 2.25904E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00

8 1 1.26970E+00 4.49833E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 3.88206E-02

8	2	1.93098E-01	1.72003E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	0.00000E+00						
9	1	1.26970E+00	4.49833E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	3.88206E-02						
9	2	1.93098E-01	1.72003E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	0.00000E+00						
10	1	1.26970E+00	4.49833E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	3.88206E-02						
10	2	1.93098E-01	1.72003E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	0.00000E+00						
11	1	1.26970E+00	4.49833E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	3.88206E-02						
11	2	1.93098E-01	1.72003E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	0.00000E+00						
12	1	1.26970E+00	4.49833E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	3.88206E-02						
12	2	1.93098E-01	1.72003E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	0.00000E+00						
13	1	1.26970E+00	4.49833E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	3.88206E-02						
13	2	1.93098E-01	1.72003E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	0.00000E+00						
14	1	1.26970E+00	4.49833E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	3.88206E-02						
14	2	1.93098E-01	1.72003E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	0.00000E+00						
15	1	1.26970E+00	4.49833E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	3.88206E-02						
15	2	1.93098E-01	1.72003E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	0.00000E+00						
16	1	1.26970E+00	4.49833E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	3.88206E-02						
16	2	1.93098E-01	1.72003E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	0.00000E+00						
17	1	1.41108E+00	3.79741E-03	2.47596E-03	0.00000E+00	3.19847E-14	0.00000E+00
0.00000E+00	2.53151E-02						
17	2	2.81156E-01	6.60146E-02	1.00127E-01	0.00000E+00	1.31093E-12	0.00000E+00
0.00000E+00	0.00000E+00						

18	1	1.41081E+00	3.83741E-03	2.74371E-03	0.00000E+00	3.55528E-14
0.00000E+00	2.52936E-02					
18	2	2.82915E-01	7.03564E-02	1.10204E-01	0.00000E+00	1.44709E-12
0.00000E+00	0.00000E+00					
19	1	1.41082E+00	3.83703E-03	2.74123E-03	0.00000E+00	3.55198E-14
0.00000E+00	2.52938E-02					
19	2	2.82899E-01	7.03171E-02	1.10112E-01	0.00000E+00	1.44585E-12
0.00000E+00	0.00000E+00					
20	1	1.41107E+00	3.79925E-03	2.48789E-03	0.00000E+00	3.21502E-14
0.00000E+00	2.53142E-02					
20	2	2.81239E-01	6.62198E-02	1.00602E-01	0.00000E+00	1.31734E-12
0.00000E+00	0.00000E+00					
21	1	1.41457E+00	4.75436E-03	4.32840E-03	0.00000E+00	5.63800E-14
0.00000E+00	2.46338E-02					
21	2	2.92460E-01	9.60346E-02	1.65325E-01	0.00000E+00	2.18366E-12
0.00000E+00	0.00000E+00					
22	1	1.41478E+00	4.71571E-03	4.12608E-03	0.00000E+00	5.36688E-14
0.00000E+00	2.46590E-02					
22	2	2.91406E-01	9.33843E-02	1.58719E-01	0.00000E+00	2.09266E-12
0.00000E+00	0.00000E+00					
23	1	1.41094E+00	3.81777E-03	2.61423E-03	0.00000E+00	3.38191E-14
0.00000E+00	2.53044E-02					
23	2	2.82068E-01	6.82684E-02	1.05350E-01	0.00000E+00	1.38142E-12
0.00000E+00	0.00000E+00					
24	1	1.41483E+00	4.70834E-03	4.08360E-03	0.00000E+00	5.31050E-14
0.00000E+00	2.46637E-02					
24	2	2.91183E-01	9.28153E-02	1.57326E-01	0.00000E+00	2.07352E-12
0.00000E+00	0.00000E+00					
25	1	1.41473E+00	4.72392E-03	4.17203E-03	0.00000E+00	5.42809E-14
0.00000E+00	2.46538E-02					
25	2	2.91646E-01	9.39956E-02	1.60223E-01	0.00000E+00	2.11335E-12
0.00000E+00	0.00000E+00					
26	1	1.41099E+00	3.81089E-03	2.56751E-03	0.00000E+00	3.31983E-14
0.00000E+00	2.53081E-02					
26	2	2.81761E-01	6.75107E-02	1.03592E-01	0.00000E+00	1.35769E-12
0.00000E+00	0.00000E+00					
27	1	1.41085E+00	3.83115E-03	2.70261E-03	0.00000E+00	3.50068E-14
0.00000E+00	2.52971E-02					

27	2	2.82651E-01	6.97034E-02	1.08683E-01	0.00000E+00	1.42651E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
28	1	1.41100E+00	3.80878E-03	2.55319E-03	0.00000E+00	3.30082E-14	0.00000E+00	2.53092E-02
28	2	2.81667E-01	6.72777E-02	1.03052E-01	0.00000E+00	1.35040E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
29	1	1.41440E+00	4.79109E-03	4.49900E-03	0.00000E+00	5.86726E-14	0.00000E+00	2.46087E-02
29	2	2.92672E-01	9.78647E-02	1.71800E-01	0.00000E+00	2.27267E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
30	1	1.41549E+00	4.61624E-03	3.46531E-03	0.00000E+00	4.48381E-14	0.00000E+00	2.47149E-02
30	2	2.87798E-01	8.39279E-02	1.36104E-01	0.00000E+00	1.78406E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
31	1	1.41546E+00	4.62076E-03	3.49796E-03	0.00000E+00	4.52741E-14	0.00000E+00	2.47125E-02
31	2	2.87983E-01	8.44195E-02	1.37261E-01	0.00000E+00	1.79976E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
32	1	1.41097E+00	3.81357E-03	2.58556E-03	0.00000E+00	3.34408E-14	0.00000E+00	2.53066E-02
32	2	2.81881E-01	6.78073E-02	1.04280E-01	0.00000E+00	1.36697E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
33	1	1.41065E+00	3.86290E-03	2.90539E-03	0.00000E+00	3.77099E-14	0.00000E+00	2.52790E-02
33	2	2.83946E-01	7.28926E-02	1.16133E-01	0.00000E+00	1.52753E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
34	1	1.41082E+00	3.83661E-03	2.73850E-03	0.00000E+00	3.54834E-14	0.00000E+00	2.52940E-02
34	2	2.82882E-01	7.02737E-02	1.10011E-01	0.00000E+00	1.44448E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
35	1	1.41084E+00	3.83216E-03	2.70928E-03	0.00000E+00	3.50954E-14	0.00000E+00	2.52965E-02
35	2	2.82694E-01	6.98097E-02	1.08930E-01	0.00000E+00	1.42986E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
36	1	1.41031E+00	3.92866E-03	3.26386E-03	0.00000E+00	4.25048E-14	0.00000E+00	2.52371E-02
36	2	2.86160E-01	7.82432E-02	1.28893E-01	0.00000E+00	1.70156E-12	0.00000E+00	0.00000E+00

37	1	1.41454E+00	4.75914E-03	4.35119E-03	0.00000E+00	5.66876E-14
		0.00000E+00	2.46306E-02			
37	2	2.92578E-01	9.63199E-02	1.66067E-01	0.00000E+00	2.19391E-12
		0.00000E+00	0.00000E+00			
38	1	1.41089E+00	3.82493E-03	2.66133E-03	0.00000E+00	3.44557E-14
		0.00000E+00	2.53005E-02			
38	2	2.82382E-01	6.90400E-02	1.07141E-01	0.00000E+00	1.40565E-12
		0.00000E+00	0.00000E+00			
39	1	1.41477E+00	4.71771E-03	4.13741E-03	0.00000E+00	5.38193E-14
		0.00000E+00	2.46578E-02			
39	2	2.91465E-01	9.35353E-02	1.59090E-01	0.00000E+00	2.09776E-12
		0.00000E+00	0.00000E+00			
40	1	1.41029E+00	3.93165E-03	3.27832E-03	0.00000E+00	4.26954E-14
		0.00000E+00	2.52352E-02			
40	2	2.86244E-01	7.84469E-02	1.29389E-01	0.00000E+00	1.70836E-12
		0.00000E+00	0.00000E+00			
41	1	1.41458E+00	4.75193E-03	4.31664E-03	0.00000E+00	5.62215E-14
		0.00000E+00	2.46355E-02			
41	2	2.92400E-01	9.58858E-02	1.64942E-01	0.00000E+00	2.17837E-12
		0.00000E+00	0.00000E+00			
42	1	1.41461E+00	4.74666E-03	4.29085E-03	0.00000E+00	5.58752E-14
		0.00000E+00	2.46390E-02			
42	2	2.92268E-01	9.55540E-02	1.64106E-01	0.00000E+00	2.16683E-12
		0.00000E+00	0.00000E+00			
43	1	1.41484E+00	4.70576E-03	4.06859E-03	0.00000E+00	5.29034E-14
		0.00000E+00	2.46652E-02			
43	2	2.91104E-01	9.26108E-02	1.56826E-01	0.00000E+00	2.06667E-12
		0.00000E+00	0.00000E+00			
44	1	1.41485E+00	4.70446E-03	4.06107E-03	0.00000E+00	5.28007E-14
		0.00000E+00	2.46660E-02			
44	2	2.91063E-01	9.25062E-02	1.56572E-01	0.00000E+00	2.06317E-12
		0.00000E+00	0.00000E+00			
45	1	1.40800E+00	3.08901E-03	1.42540E-03	0.00000E+00	1.81898E-14
		0.00000E+00	2.58756E-02			
45	2	2.72529E-01	4.43616E-02	5.55763E-02	0.00000E+00	7.24917E-13
		0.00000E+00	0.00000E+00			
46	1	1.40802E+00	3.08799E-03	1.40847E-03	0.00000E+00	1.79640E-14
		0.00000E+00	2.58755E-02			

46	2	2.72393E-01	4.40756E-02	5.48894E-02	0.00000E+00	7.15552E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
47	1	1.41488E+00	4.70005E-03	4.03492E-03	0.00000E+00	5.24488E-14	0.00000E+00	2.46687E-02
47	2	2.90924E-01	9.21470E-02	1.55697E-01	0.00000E+00	2.05117E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
48	1	1.41493E+00	4.69179E-03	3.98435E-03	0.00000E+00	5.17684E-14	0.00000E+00	2.46737E-02
48	2	2.90651E-01	9.14466E-02	1.53997E-01	0.00000E+00	2.02789E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
49	1	1.41473E+00	4.72292E-03	4.16656E-03	0.00000E+00	5.42078E-14	0.00000E+00	2.46544E-02
49	2	2.91617E-01	9.39230E-02	1.60044E-01	0.00000E+00	2.11088E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
50	1	1.41571E+00	4.58858E-03	3.26347E-03	0.00000E+00	4.21470E-14	0.00000E+00	2.47287E-02
50	2	2.86642E-01	8.08414E-02	1.28860E-01	0.00000E+00	1.68595E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
51	1	1.40800E+00	3.08899E-03	1.42505E-03	0.00000E+00	1.81851E-14	0.00000E+00	2.58756E-02
51	2	2.72527E-01	4.43557E-02	5.55619E-02	0.00000E+00	7.24722E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
52	1	1.40786E+00	3.09725E-03	1.54210E-03	0.00000E+00	1.97497E-14	0.00000E+00	2.58752E-02
52	2	2.73468E-01	4.63014E-02	6.02546E-02	0.00000E+00	7.88873E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
53	1	1.40795E+00	3.09163E-03	1.46647E-03	0.00000E+00	1.87373E-14	0.00000E+00	2.58758E-02
53	2	2.72862E-01	4.50498E-02	5.72317E-02	0.00000E+00	7.47513E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
54	1	1.40815E+00	3.08258E-03	1.29962E-03	0.00000E+00	1.65000E-14	0.00000E+00	2.58732E-02
54	2	2.71494E-01	4.21894E-02	5.03778E-02	0.00000E+00	6.54194E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
55	1	1.40743E+00	3.13441E-03	1.89680E-03	0.00000E+00	2.45376E-14	0.00000E+00	2.58574E-02
55	2	2.75646E-01	5.15151E-02	7.41988E-02	0.00000E+00	9.81546E-13	0.00000E+00	0.00000E+00

56	1	1.40743E+00	3.13441E-03	1.89680E-03	0.00000E+00	2.45376E-14	0.00000E+00	2.58574E-02
56	2	2.75646E-01	5.15151E-02	7.41988E-02	0.00000E+00	9.81546E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
57	1	1.43101E+00	2.88597E-03	1.72091E-03	0.00000E+00	2.22769E-14	0.00000E+00	2.58747E-02
57	2	2.77484E-01	5.14673E-02	7.15295E-02	0.00000E+00	9.38626E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
58	1	1.43106E+00	2.87917E-03	1.67205E-03	0.00000E+00	2.16269E-14	0.00000E+00	2.58783E-02
58	2	2.77104E-01	5.06207E-02	6.95594E-02	0.00000E+00	9.12104E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
59	1	1.41558E+00	4.60519E-03	3.38515E-03	0.00000E+00	4.37653E-14	0.00000E+00	2.47204E-02
59	2	2.87340E-01	8.27075E-02	1.33236E-01	0.00000E+00	1.74518E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
60	1	1.41547E+00	4.61857E-03	3.48223E-03	0.00000E+00	4.50641E-14	0.00000E+00	2.47137E-02
60	2	2.87894E-01	8.41831E-02	1.36704E-01	0.00000E+00	1.79221E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
61	1	1.41570E+00	4.58991E-03	3.27322E-03	0.00000E+00	4.22758E-14	0.00000E+00	2.47280E-02
61	2	2.86698E-01	8.09911E-02	1.29211E-01	0.00000E+00	1.69069E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
62	1	1.41521E+00	4.65286E-03	3.72788E-03	0.00000E+00	4.83416E-14	0.00000E+00	2.46958E-02
62	2	2.89261E-01	8.78114E-02	1.45284E-01	0.00000E+00	1.90886E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
63	1	1.40779E+00	3.10179E-03	1.59540E-03	0.00000E+00	2.04711E-14	0.00000E+00	2.58741E-02
63	2	2.73896E-01	4.71753E-02	6.23784E-02	0.00000E+00	8.18016E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
64	1	1.40799E+00	3.08913E-03	1.42732E-03	0.00000E+00	1.82154E-14	0.00000E+00	2.58757E-02
64	2	2.72545E-01	4.43939E-02	5.56539E-02	0.00000E+00	7.25975E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
65	1	1.40785E+00	3.09780E-03	1.54880E-03	0.00000E+00	1.98399E-14	0.00000E+00	2.58751E-02

65	2	2.73522E-01	4.64116E-02	6.05216E-02	0.00000E+00	7.92533E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
66	1	1.40794E+00	3.09185E-03	1.46971E-03	0.00000E+00	1.87807E-14	0.00000E+00	2.58758E-02
66	2	2.72888E-01	4.51040E-02	5.73623E-02	0.00000E+00	7.49297E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
67	1	1.40759E+00	3.11899E-03	1.76616E-03	0.00000E+00	2.27748E-14	0.00000E+00	2.58668E-02
67	2	2.75228E-01	4.98368E-02	6.89962E-02	0.00000E+00	9.09341E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
68	1	1.40755E+00	3.12304E-03	1.80104E-03	0.00000E+00	2.32443E-14	0.00000E+00	2.58645E-02
68	2	2.75492E-01	5.03496E-02	7.03144E-02	0.00000E+00	9.27637E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
69	1	1.40755E+00	3.12311E-03	1.80166E-03	0.00000E+00	2.32527E-14	0.00000E+00	2.58644E-02
69	2	2.75496E-01	5.03585E-02	7.03379E-02	0.00000E+00	9.27962E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
70	1	1.40751E+00	3.12736E-03	1.83691E-03	0.00000E+00	2.37288E-14	0.00000E+00	2.58619E-02
70	2	2.75761E-01	5.08736E-02	7.16625E-02	0.00000E+00	9.46388E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
71	1	1.40802E+00	3.08793E-03	1.40749E-03	0.00000E+00	1.79508E-14	0.00000E+00	2.58755E-02
71	2	2.72385E-01	4.40590E-02	5.48494E-02	0.00000E+00	7.15007E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
72	1	1.40788E+00	3.09557E-03	1.52093E-03	0.00000E+00	1.94661E-14	0.00000E+00	2.58755E-02
72	2	2.73299E-01	4.59536E-02	5.94126E-02	0.00000E+00	7.77338E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
73	1	1.43112E+00	2.87154E-03	1.61494E-03	0.00000E+00	2.08675E-14	0.00000E+00	2.58822E-02
73	2	2.76655E-01	4.96222E-02	6.72411E-02	0.00000E+00	8.80922E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
74	1	1.43109E+00	2.87561E-03	1.64572E-03	0.00000E+00	2.12767E-14	0.00000E+00	2.58802E-02
74	2	2.76898E-01	5.01615E-02	6.84925E-02	0.00000E+00	8.97750E-13	0.00000E+00	0.00000E+00

75	1	1.40758E+00	3.11992E-03	1.77440E-03	0.00000E+00	2.28863E-14	0.00000E+00	2.58663E-02
75	2	2.75291E-01	4.99591E-02	6.93102E-02	0.00000E+00	9.13696E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
76	1	1.40743E+00	3.13441E-03	1.89680E-03	0.00000E+00	2.45376E-14	0.00000E+00	2.58574E-02
76	2	2.75646E-01	5.15151E-02	7.41988E-02	0.00000E+00	9.81546E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
77	1	1.41440E+00	4.79109E-03	4.49900E-03	0.00000E+00	5.86726E-14	0.00000E+00	2.46087E-02
77	2	2.92672E-01	9.78647E-02	1.71800E-01	0.00000E+00	2.27267E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
78	1	1.41440E+00	4.79109E-03	4.49900E-03	0.00000E+00	5.86726E-14	0.00000E+00	2.46087E-02
78	2	2.92672E-01	9.78647E-02	1.71800E-01	0.00000E+00	2.27267E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
79	1	1.40743E+00	3.13441E-03	1.89680E-03	0.00000E+00	2.45376E-14	0.00000E+00	2.58574E-02
79	2	2.75646E-01	5.15151E-02	7.41988E-02	0.00000E+00	9.81546E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
80	1	1.40743E+00	3.13441E-03	1.89680E-03	0.00000E+00	2.45376E-14	0.00000E+00	2.58574E-02
80	2	2.75646E-01	5.15151E-02	7.41988E-02	0.00000E+00	9.81546E-13	0.00000E+00	0.00000E+00
81	1	1.41440E+00	4.79109E-03	4.49900E-03	0.00000E+00	5.86726E-14	0.00000E+00	2.46087E-02
81	2	2.92672E-01	9.78647E-02	1.71800E-01	0.00000E+00	2.27267E-12	0.00000E+00	0.00000E+00
82	1	1.26970E+00	4.49833E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.88206E-02
82	2	1.93098E-01	1.72003E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
83	1	1.26970E+00	4.49833E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.88206E-02
83	2	1.93098E-01	1.72003E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
84	1	1.26970E+00	4.49833E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.88206E-02

84	2	1.93098E-01	1.72003E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
85	1	1.26970E+00	4.49833E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
85	2	1.93098E-01	1.72003E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
86	1	1.26970E+00	4.49833E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
86	2	1.93098E-01	1.72003E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
87	1	1.34744E+00	6.69152E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
87	2	9.01264E-01	1.73887E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
88	1	1.34744E+00	6.69152E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
88	2	9.01264E-01	1.73887E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
89	1	6.71784E-01	6.46733E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
89	2	5.16651E-01	9.75944E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
90	1	6.71784E-01	6.46733E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
90	2	5.16651E-01	9.75944E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
91	1	1.34784E+00	4.07772E-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
91	2	2.85123E-01	1.37978E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
92	1	1.25173E+00	4.58251E-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
92	2	1.78126E-01	1.74661E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
93	1	1.64183E+00	3.69438E-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
93	2	4.98082E-01	1.29354E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

94	1	1.34784E+00	4.07772E-04	0.0	
0.0		2.77842E-02			
94	2	2.85123E-01	1.37978E-02	0.0	
0.0		0.0			
95	1	1.29674E+00	7.85307E-03	8.18440E-03	0.0
0.0		2.82375E-02			1.06862E-13
95	2	2.70712E-01	1.46586E-01	2.71843E-01	0.0
0.0		0.0			3.59638E-12
96	1	1.29674E+00	7.85307E-03	8.18440E-03	0.0
0.0		2.82375E-02			1.06862E-13
96	2	2.70712E-01	1.46586E-01	2.71843E-01	0.0
0.0		0.0			3.59638E-12
97	1	1.64248E+00	3.67779E-04	0.0	
0.0		1.26697E-02			
97	2	5.05496E-01	1.27862E-02	0.0	
0.0		0.0			
1.0		0.0			
999					

Apêndice C

Programa MTRCR-IEA-R1

C.1 INPUT - Posição 36

{Simulação simplificada do Elmento de miniplcas –
CASO 5–2

Posição 36–1 / U3SI2 PLACA DE 2cm e 4.8gU/cm3

Analise Conservativa

MAXIMA TEMP. ENT.42 C

Mini Placas com as Seguintes dimensões:

Hc=714,4 mm altura do canal (não importa para modelo térmico; é só para acertar a u3si48.2.lkt

Hp= 118 altura ativa da placa

Lp =40 mm largura ativa da placa

Lc =47mm Largura do canal

Ec=3,70 mm espessura do canal de refrigeração

Ef=0.76 mm{espessura do fuel}

Er=0.38 mm{espessura do revestimento}

Densidade de potência máxima W/cm3

hipoteses:

–regime permanente;

–

– }

{Definicao de algumas funcoes para facilitar na solucao}

{Funcao para calculo do Numero de Reynolds}

```

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

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

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

ht:=0,023*(re**0,8*pr**0,4)*k/dh+(mi1/mip)*0
{ht:=0.027*(re**0.8*pr**0.33)*k/dh+(mi1/mip)**0.14}
hl:=8,235*k/dh {a verificar se necessario}
hlt:=((re-2000)*ht+(4000-re)*hl)/2000
if ( re>4000) Then

    h:=ht

Else

    if (re<2000) Then

        h:=hl

    Else

        h:=hlt

    Endif

Endif
END

n=25 { número de volumes axiais}

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

{vaz=13,0} {m3/h} {Vazão no elemento combustivel}
fev=1,0 {fator de erro na vazão}
vaz1=vaz/3600
g=vaz1/ae*rho[1]/9 {fluxo de massa}
Tsatsat=114,02

```

```

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

Ntp =10 {No. total de mini-placas comb.}
Vtc = Ntp*vtp{ vol. totaldas mini placas}
Pop= 14696,8056 { Pot. de dissipada nas mini-placas W}
{cor=1 { COR=1>>>> Bergles&Rohsenow; COR=0 >>>> Dittus & Boelter}}
f=1,522 {fatores de incerteza}

{=====}

{dados - canal/placa}
Hp=0,118 {altura da placa em m}
Hc=714,4
Lc=47,0e-3 {largura do Canal em m}
Lp=40,0e-3 {largura ativa da placa em m}
Ep=1,52e-3 {espessura total da placa m}
Ef=0,76e-3{espessura do fuel}
Er=0,38e-3{espessura do revestimento}
Ec=3,7e-3{espessura do canal em m}

DUPLICATE I=0;n-1
m[i+1]=fev*vazl*rho[i+1]/9 { vazao massica por canal kg/s Div 12 canais }
END

Pl=1,6 {pressão de operação }
ae=Lc*Ec {area de escoamento de um canal em m2}

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

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

{propriedades fisicas no SI}

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

```

```

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

```

END

```

kf=50,0{ {W/m K} K medio para comb. de 4.8 gU/cm^3}
Kr=180 {W/m K}

```

```

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

```

```

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

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

```

```

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

```

{definicao das condutancias}

```

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

```

```

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

```

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

```

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

```

{1}

```

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

```

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

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

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

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

```
{ Temperatura de ONB
```

```
Correlação de Bergles and Rohsenow
```

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

```
onde:
```

```
Tsat – Temperatura de Saturação
```

```
p – pressão
```

```
q – fluxo local
```

```
}
```

```
DUPLICATE i=1;n
```

```
Tonb [ i ] = Tsat + 5/9*(9,23*(q [ i ]/10000/(2*atr ))/(p1**1,156))**((p1**0,0234)/2,16)
```

```
END
```

Pc=221,2 {pressão crítica }

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

teta=0,99531*(p1**0,3333)*((1-p1/pc)**(4/3))

vel=(vaz1/9)/ae

dtsub=tsat-t1[20]

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

media=pot3/n

DUPLICATE I=1;n

DTS[i]=Tsat-t1[n]

qc[i]=145,4*teta*((1+2,5*(vel*100)**2/teta)**0,25)*(1+15,1*cpa[i]*DTS[n]/(hlg*p1**0,5))/10000
{LABUNTSOV}

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

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

MI[i]=151*(1+0,1198*vel)*(1+0,00914*(Tsat-t1[n]))*(1+,19*p1) { OK com PARET}

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

END

{INSTABILIDADE DE FLUXO

CORRELAÇÃO DE

}

eta =25

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

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

DUPLICATE I=1;n

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

qifc[i]=R**vel*100*(Lc*ec*0,9)/(Lp*Hp)*(tsat-t1[1])*rho[1]/1000*cpa[1]/1000 {Paret Prop. no pto

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

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

END

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

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

DUPLICATE i=1,n

```
{ qifc [ i ] = rho [ i ] / 1000 * cpa [ i ] * R * vel * 100 * ( Tsat - t1 [ i ] ) * ( Lp * 100 * Lc * 100 ) / ( Lp * 100 * Hp * 100 ) / 10000 }
```

Apêndice D

Programa FLOW

D.1 INPUT

CÁLCULO DA VAZÃO NOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS COM O DIM INSERIDO NO NÚCLEO

772,22			vazao da bomba	
992,8.00e-4			densidade , viscosidade	
21,6,4,0			ncb,neira,nect,neis	
56,0			ncec,ncr	
0,3			nfppm,nfspm	
51.4e-3	44.7e-3	5091.e-6		el. combustiveis
625.0e-3	5.54e-3	3271.1e-6		
13.e-3	44.7e-3	5091.e-6		
152.e-3	50.8e-3	2027.e-6		
-1	0	0		
0.40		5091.e-6		
0.6		3297.e-6		
0.20		2027.e-6		
0.60		2027.e-6		
-1	0			
1000.e-3	39.7e-3	4925.e-6		el. de irradiacao refrig. a agua
152.e-3	50.8e-3	2027.e-6		
-1	0	0		
35.		4761.e-6		
-1	0			
69.0e-3	48.36e-3	3869.e-6		el. de controle
625.e-3	5.54e-3	2501.e-6		
13.e-3	48.35e-3	3869.e-6		

152.e-3	50.8e-3	2027.e-6	
-1	0	0	
0.4	6400.e-6		
0.20	2027.e-6		
0.60	2027.e-6		
-1	0		
677.e-3	151.e-3	22801.e-6	el. de irradiacao de silicio
130.e-3	50.8e-3	4054.e-6	
-1	0	0	
0.4	22801.e-6		
1500.	22801.e-6		
0.6	3180.e-6		
-1	0		
714.e-3	5.52e-3	421.2e-6	canais entre elementos
114.e-3	22.23e-3	388.e-6	
-1	0	0	
0.4	421.2E-6		
0.6	2313e-6		
0.5	388e-6		
0.6	388e-6		
-1	0		
-1	0	0	
-1	0		
-1	0		
0.5	388e-6		

Apêndice E

Programa LOSS

E.1 Programa Fonte

```
program loss fonte
implicit real (a-k,o-z)
implicit integer (l-n)
data g/9.8e+00/, pi/3.14159e+00/
C  LOSSNEW
C  PROGRAMA PARA ANALISE DE LOCA DO IEA-R1
C  PARTE 1 ESVAZIAMENTO
open (5,file='lossnew.dat',status='old')
open (6,file='lossnew.out')
C  NOMENCLATURA
C  nac=tipo de acidente
C  nac=1-ruptura dos tubos do SPI
C  nac=2-drenos da piscina (ruptura no SRA)
C  nac=3-ruptura da fronteira do prim rio
C  nac=4-abertura dos drenos do SRA
C  nac=5-ruptura do tubos colimadores
C  dt=incremento de tempo (s)
C  tmax=tempo m ximo do transiente (s)
C  Apis= rea da seçaoo transversal da piscina
```

```

C      Drup=Diâmetro da tubulação na ruptura
C      h=coluna d'água total (da superfície da piscina ao porão) (m)
C      hap=coluna d'água na piscina (m)
C      fcv=fator de correção do volume útil da piscina
C      nt=número de tubos rompidos
C      kcv=coeficiente de perda de carga nas curvas
C      krl= coeficiente de perda de carga no ralo
C      kdf=coeficiente de perda de carga no difusor
C      kvb=coeficiente de perda de carga na válvula de isolamento
C      ktee=coeficiente de perda de carga no tê
C      hdb 'set-point' de desligamento da bomba por nível baixo (m)
C      Adf=área da seção transversal do difusor
C      Atub= área da seção transversal da tubulação na ruptura
700    format(7X,'Tempo (s)',4X,'Altura d'gua (m)',2X,'Vazão (m3/s)',
1      'velocidade (m/s)'/)
      read(5,*)nac
      read(5,*)dt
      read(5,*)tmax
      read(5,*)Apis
      if(nac.eq.5) goto 24
      read(5,*)h
24     read(5,*)hap
      read(5,*)fcv
      if(nac.eq.4) goto 40
      read(5,*)Drup
      if(nac.eq.2) goto 20
      if(nac.eq.3) goto 30
      if(nac.eq.4) goto 25
      read(5,*)nt
      if(nac.eq.5) goto 25
      goto 40

```

```
20      read(5,*)kcv
      read(5,*)krl
      goto 40
25      read(5,*)kbh
      read(5,*)hmin
      goto 40
30      read(5,*)kcv
      read(5,*)kdf
      read(5,*)kvb
      read(5,*)ktee
      read(5,*)hdb
      read(5,*)Adf
      read(5,*)Atub
40      close(5)
      vel=0
      time=0.0e+00
      if(nac.eq.5) goto 201
C      Coeficiente da curva da bomba
      A0=26.2
      A1=216.5
      A2=-2209.7
      A3=8048.0
      A4=-12784.2
      ddh=h-hap
      hdbt=hdb+ddh
      if(nac.eq.4) goto 400
      Arup=pi*(drup**2.0)/4.0
      if(nac.eq.1) goto 100
      if(nac.eq.2) goto 200
      if(nac.eq.3) goto 300
      if(nac.eq.4) goto 400
```

```

C      nac=1-Ruptura dos Coelhos
100    D=2.0/(2.*g*Arup**2.)
110    write(6,*)time,hap,Q,vel
        time=time+dt
        Q=sqrt(h/(D))
        Q=nt*Q
        h=h-dt*Q/(Apis/fcv)
        vel=Q/Arup
        hap=h-ddh
        if((time.lt.tmax).and.(hap.gt.0.)) goto 110
        goto 800

C      nac=2-Ruptura no Sistema de Retratoamento
200    C=(kcv+krl)/(2.0*g*Arup*2)
        D=2.0/(2.0*g*Arup**2)
210    write(6,*)time,hap,Q,vel
        time=time+dt
        Q=sqrt(h/(D))
        h=h-dt*Q/(Apis/fcv)
        vel=Q/Arup
        hap=h-ddh
        if((time.lt.tmax).and.(hap.gt.0.)) goto 210
        goto 800

C      nac=3-Ruptura do Prim rio (com Bomba)
300    B=kdf/(2.0*g*Adf**2)
        C=(ktee+kcv+kvb)/(2.0*g*Atub**2)
        D=1.0/(2.*g*Arup**2)
310    write(6,*)time,hap,QT,vel
        time=time+dt
        QD=sqrt(h/(B+C+D))
        if(h.lt.hdbt) goto 370
        do 350 l=1,1000000

```

```

dQB=1 / 100000.
QB=0.2+dQB
hb=(QB**2)/0.0614 - h + 255.0*QB**2
x=QB
y=A0+ A1*x+ A2*x**2+ A3*x**3+ A4*x**4
DDA=ABS(HB-Y)
IF (DDA.LT.0.01) goto 351
350  continue
351  QT=QD+QB
    h=h-dt*QT/( Apis / fcv )
    vel=QD/Arup
    hap=h-ddh
    goto 375
370  QBL=sqrt (h/(1/0.0614+255))
    QB=QBL
    goto 351
375  if ((time.lt.tmax).and.(hap.gt.0.)) goto 310
    goto 800
C    nac=4-abertura dos drenos do SRA
400  time=0.0e+00
410  write (6,*) time , hap , QT, vel
    time=time+dt
    k1=4109147.0
    Q1=sqrt (h/k1)
    k2=4109147.0
    Q2=sqrt (h/k2)
    k3=1.325E11
    Q3=sqrt (h/k3)
    k4=2.865E08
    Q4=sqrt (h/k4)
    k5=9301193.0

```

```

Q5=sqrt (h/k5)
k6=7334400.0
Q6=sqrt (h/k6)
Q=Q1+Q2+Q3+Q4+Q5+Q6
h=h-dt*Q/( Apis / fcv )
hap=h-ddh
if (( time . lt . tmax ). and . ( hap . gt . 0. ) ) goto 410
goto 800
C    nac-5 Ruptura dos Tubos de Irradiação
201  hef=hap-hmin
      Arup=pi*(drup**2.0)/4.0
      C=(kbh)/(2.0*g*Arup*2)
      D=2.0/(2.0*g*Arup**2)
211  write(6,*)time,hap,QT,vel
      time=time+dt
      Q=sqrt ( hef / (C+D) )
      hef=hef-dt*Q/( Apis / fcv )
      vel=Q/Arup
      hap=hef+hmin
      if (( time . lt . tmax ). and . ( hap . gt . hmin ) ) goto 211
800  close(6)
      end

```

E.1.1 Dados de Entrada

Caso 1 - Ruptura dos Tubos do Sistema Pneumático de Irradiação (SPI)

```

1
2.0
100000
28.737
11.5
8.8

```

1.1

0.045

4

Caso 2 - Falha nos Drenos da Piscina - Ruptura dos Tubos de Acesso SRA

2

2.0

20000

28.737

11.5

8.8

1.1

0.0525

2.85

1.4

Caso 3 - Ruptura da Fronteira do Circuito Primário do IEA-R1

3

1.0

500.0

28.737

11.5

8.95

1.1

0.267

0.42

150.

0.1

1.0

8.4

1.677

0.056

Caso 4 - Abertura Indevida dos Drenos do SRA

4

2.0

50000.0

28.737

11.5

8.8

1.1

Caso 5 - Falha nos Tubos Colimadores (BH-3)

5

2.0

20000

28.737

8.8

1.1

0.2

1

0.

1.591

Apêndice F

Programa TEMPLOCA

F.1 Programa Fonte

```
program tempolca
implicit real(a-h,m-z)
implicit integer(i-l)
character tit*40
open(5,file='temploca.dat',status='old')
open(6,file='temploca.out',status='unknown')
```

C PM-Potencia de operação em dias por elemento (MW)

C TMAX-tempo máximo do transiente (s)

C TLAG-tempo entre o desligamento do reator e o descobrimento do núcleo (s)

C TIFC-temperatura do combustível no instante inicial após o descobrimento (C)

C TARC-temperatura inicial do ar após o descobrimento (C)

C fr-fator de potencia radial do elemento analisado

C fs-fator de incerteza para a potencia de decaimento

C fsp-fator de sobrepotencia

C IMCP-opção para a massa e o calor especifico

C IMCP=1-utilização do fator de correção fmcp

C IMCP=2-utilização das massas e dos calores específicos do U3O8

C fmcp-fator de correlação da massa e do calor especifico

C MAL-massa de alumínio do elemento combustível (kg)

C MFU-massa de combustível do elemento combustível (kg)

C WU- fração em peso de U na dispersão

C icdec-opção para escolha da curva de decaimento.

C icdec=1-equação de Way-Wigner;

C icdec=2-equação de decaimento exponencial.

```

C      TO-tempo de operação do reator anterior ao seu desligamento
C      (ou tempo de irradiação) (s)
C      A0, A1, A2, A3, k0, k1, k2, e k3—coeficiente da equação de decaimento
C      exponencial (somente utilizados se idec=2)
      read(5,10) tit
10     format(A40)
      read(5,*)pm
      read(5,*)tmax
      read(5,*)tlag
      read(5,*)fr
      read(5,*)fs
C      read(5,*)fg
      read(5,*)fsp
      read(5,*)imcp
      if(imcp.eq.2) goto 20
      read(5,*)fmcp
      goto 30
20     read(5,*)mal
      read(5,*)mfu
30     read(5,*)wu
      read(5,*)tffc
      read(5,*)tarc
      read(5,*)icdec
      if(icdec.eq.2) goto 40
      read(5,*)to
      read(5,*)w
C      w=6.22e-02
      x=-0.2
      y=0.2
      goto 50
40     read(5,*)x0,y0,t1,a1,t2,a2,t3,a3
      en=2.718282
50     write(6,60) tit
60     format(a40//)
      write(6,70)
70     format(5x,'tempo (s)',6x,'temperatura(C)'/)
C      p=pm*fr*fs*fg*fsp
      p=pm*fr*fs*fsp

```

```

t=0.0
dt=1.
td=t+tlag
tc=tifc
tif=(tifc*9./5.)+32.
tar=(tarc*9./5.)+32.
dth=tif-tar
ddth=0.
80  continue
td=td+dt
if(imcp.lt.2) goto 90
cpal=0.892+0.00046*tc
cpfu=0.892+0.00046*tc-wu*(0.734+0.00019*tc)
m=mal+mfu
mcp=1.055e-3*((mal*2.205*cpal*0.239)+(mfu*2.205*cpfu*0.239))
90  if(icdec.eq.2) goto 100
a=td**x
b=(td+to)**x
q=w*p*(a-b)
goto 110
100 y=y0+a1*en**(-(td-x0)/t1)+a2*en**(-(td-x0)/t2)+a3*en**(-(td-x0)
1 /t3)
q=y*p
110 if(imcp.eq.1) goto 120
ddth=(q-dth*(1.3e-06*(6.4e-03*dth**0.72+0.5)))*(dt/(mcp))
goto 130
120 ddth=(q-dth*(1.3e-06*(6.4e-03*dth**0.72+0.5)))*(dt/(4.2e-3*fmcp))
130 dth=ddth+dth
th=dth+tar
tc=(th-32.)*5./9.
write(6,*)td,tc
C  write(6,*)td,y,q,mcp,cpal,cpfu
C  write(6,*)td,th
if(td.lt.tmax) goto 80
close(6)
end

```

F.1.1 Dados de Entrada

0.015

60000.

324.

1.227

1.1

1.0

1

0.0042

0.7237

100.

32.

1

432000.

6.22E-02

Referências Bibliográficas

- 1 - BREAZEÀLE, W.M. The swimming pool. A low cost research reactor. Nucleonics, v. 10, n. 11, p. 56-60, 1952.
- 2 - WAUGH, R.C. The reaction and growth of uranium dioxide-aluminum fuel plates and compacts. Tennessee: Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, Mar. 1959. (ORNL-2701).
- 3 - SIMÕES, A.V. Desempenho sob irradiação de combustíveis a dispersão de MTR. 1993. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 4 - TISSIER, A. CERCA: Working towards better LEU fuel production, v. 36, n. 449, p. 1-50, 1991.
- 5 - Nazaré, S. low enrichment dispersion fuels for research and test reactors. J. Nucl. Mater, n. 124, p. 14-24, 1984.
- 6 - LANNING, D.; LEWIS, R.; STAHL, D. National plan for development of high uranium density research and testreactor fuel accommodate use of low uranium enrichment. Proc. Intl. Mtg on RERTR, v. 1, p. 10, 1977.
- 7 - SNELGROVE, J.L. Qualification status of LEU [low enriched uranium] fuels. Proc. Intl. Mtg on RERTR, Buenos Aires, Argentina, 1987, Comissão Nacional de

Energia Atomica, Buenos Aires 1987, p. 195-203.

8 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Good practices for qualification of high density low enriched uranium research reactor fuels. Vienna: IAEA, 2009. (IAEA Nuclear Energy Series - N^o NF-T-5.2).

9 - SILVA, J.E.R.; SILVA, A.T.; TERREMOTO, L.A.A.; DURAZZO, M. Program for in-pile qualification of high density silicide dispersion fuel at IPEN-CNEN/SP. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE - INAC, September 27 to October 2, 2009, Rio de Janeiro. Proceedings Rio de Janeiro: ABEN, 2009. p. 1-8.

10 - TERREMOTO, L.A.A.; DAMY, M.A.; UMBEHAUN, P.E.; CEGALLA, M.A.; YAMAGUCHI, M. Acompanhamento da irradiação dos elementos combustíveis nacionais no reator IEA-R1. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Nov. 2004. (PSE.CENC.IEAR1.068.00 RELT.003.00).

11 - SILVA, J.E.R.; DOMINGOS, D.B.; SILVA, A.T. Fuel miniplate thickness measurement system for dispersion fuel swelling evaluation. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE - INAC, September 27 to October 2, 2009, Rio de Janeiro. Proceedings Rio de Janeiro: ABEN, 2009. p. 1-10.

12 - DOMINGOS, D.B.; SILVA, A.T.; UMBEHAUN, P.E.; SILVA, J.E.R.; CONTI, T.N.; YAMAGUCHI, M. Neutronic, thermal-hydraulic and accident analysis calculation for an irradiation device to be used in the qualification process of dispersion fuels in the IEA-R1. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE - INAC, September 27 to October 2, 2009, Rio de Janeiro. Proceedings Rio de Janeiro: ABEN, 2009. p. 1-9.

13 - FOWLER, T.B.; VONDY, D.R.; CUNNINGHAM, G.W. Nuclear reactor core analysis code: CITATION. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, Jul. 1971. (ORNL-TM-2496 Rev. 2).

-
- 14 - YAMAGUCHI, M. Análise neutrônica do núcleo do reator IEA-R1 para 5 MW. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Maio. 1997. (PSI.REN.IEAR1.002,RELT.002.R00).
- 15 - DUDERSTADT, J.J.; HAMILTON, L.J. Nuclear reactor analysis. John Wiley & Sons, 1976.
- 16 - LAMARSH, J.R. Introduction to nuclear reactor theory. Addison-Wesley Publishing Company, 1972.
- 17 - UMBEHAUN, P.E. Metodologia para análise termo-hidráulico de reatores de pesquisa tipo piscina com combustível tipo placa. 2000. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 18 - IDEL'CIK, I.E. Memento de pertes de charge coefficients de pertes de charge singulieres et de pertes de charge par frottement. Paris: Eyrolles, 1969.
- 19 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Homogenization methods in reactor physics. Vienna: IAEA, May. 1980. (IAEA-TECDOC-231).
- 20 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Code on the safety of nuclear research reactor: DESIGN. Vienna: IAEA, 1992. (IAEA-Safety Standards N^o 35-S1).
- 21 - MILLER, D.R. Critical velocities for collapse of reactor parallel plate fuel assemblies. [S.l.:s.n.], Aug. 1958. (KAPL-1954).
- 22 - BERGLES, A.E.; ROSENOW, W.M. The determination of forced-convection surface boiling heat transfers. Trans. of the ASME 86 (Series C-Journal. of Heat Transfer), p. 365-375, Aug. 1964.

- 23 - LABUNTSOV, D.A. Critical thermal loads in forced motion of water which is heated to a temperature below the saturation temperature. Soviet Journal of Atomic Energy, v. 10, n. 5, p. 523-525, 1960.
- 24 - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. Relatório de análise de segurança do reator IEA-R1. São Paulo: IPEN, 1996. (RAS-IEA-R1m).
- 25 - MAPRELIAN, E.; CABRAL, E.L.L.; SILVA, A.T. Análise dos acidentes de perda de refrigerante do reator IEA-R1 a 5 MW. XI ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DE REATORES - ENFIR, 1997, Poços de Caldas. Proceedings Poços de Caldas: ABEN, 1997. p. 534-538.
- 26 - WETT, J.F.J.R. Surface temperatures of irradiated OOR fuel elements cooled in stagnat air. Tennessee: Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, Apr 6. 1960. (ORNL-2892).
- 27 - COX, J.A.; WEBSTER, C.C. Water-loss tests at the low intensity testing reactor. Tennessee: Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, Aug. 196a. (ORNL-TM-632).
- 28 - FOX, R.W.; MCDONALD, A.T. Introdução à mecânica dos fluidos. Guanabara Dois, 1981.
- 29 - MAPRELIAN, E. Análise de acidentes de perda de refrigerante no reator IEA-R1 a 5 MW. 1998. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 30 - LOS ALAMOS SCIENTIFIC LABORATORY. 1969 STATUS REPORT on the Omega West Reactor, with safety analysis. Los Alamos: Cal., May 1969. (LA-4192,TID-4500).