

## AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

## DESENVOLVIMENTO DE UM ELEMENTO COMBUSTÍVEL INSTRUMENTADO PARA O REATOR DE PESQUISA IEA-R1

## PEDRO ERNESTO UMBEHAUN

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

Orientador: Prof. Dr. Delvonei Alves de Andrade

São Paulo 2016

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

## DESENVOLVIMENTO DE UM ELEMENTO COMBUSTÍVEL INSTRUMENTADO PARA O REATOR DE PESQUISA IEA-R1

## PEDRO ERNESTO UMBEHAUN

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

Orientador: Prof. Dr. Delvonei Alves de Andrade

Versão Corrigida Versão Original disponível no IPEN

> São Paulo 2016

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha esposa Rosimeire e ao meu filho Gustavo.

#### Agradecimentos

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/CNEN-SP pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador Dr. Delvonei Alves de Andrade pelo incentivo, amizade e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora Dr. Fernando Roberto Andrade Lima, Dra. Elita Fontenele Urano de Carvalho, Dr. Gabriel Angelo e Dr. Walmir Maximo Torres por aceitarem o convite para integrar a Comissão Julgadora do Exame desta Tese.

Nenhum homem é uma ilha. Este trabalho é fruto do empenho, colaboração e integração de vários Centros do IPEN/CNEN-SP, do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) e da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA).

A semente deste trabalho começou no final dos anos 90 e início dos anos 2000. O primeiro grande impulso foi dado pelo Dr. José Augusto Perrotta, na época gerente do Centro de Engenharia Nuclear (CEN) do IPEN/CNEN-SP, que apoiou e incentivou irrestritamente esta idéia. Com o apoio e incentivo dele iniciou-se um projeto de cooperação com a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), através de um Contrato de Projeto de Pesquisa (CRP). Este contrato possibilitou a aquisição de equipamentos e instrumentos que viabilizaram o projeto.

Outra pessoa fundamental no desenvolvimento deste projeto foi o meu amigo Dr. Walmir Maximo Torres, que participou ativamente desde a concepção original, participando das reuniões na IAEA, montagem do primeiro protótipo até a montagem final do Elemento Combustível Instrumentado e no planejamento e na realização dos experimentos.

Agradeço aos gerentes do Centro de Engenharia Nuclear (CEN) do IPEN/CNEN-SP, desde o Dr. José Augusto Perrotta, Dr. Antonio Teixeira e Silva, Dr. Ulysses Dutra Bitelli até o atual gerente MSc. Leslie de Molnary.

Ao Centro do Combustível Nuclear (CCN) devo um agradecimento especial aos amigos MSc. José Antonio Batista de Souza, Dr. Michelangelo Durazzo, Dra. Elita Fontenele Urano de Carvalho, Davilson Gomes da Silva, Olair dos Santos e todos os demais engenheiros e técnicos que direta ou indiretamente participaram deste projeto.

Ao Centro do Reator de Pesquisa (CRPq) agradeço ao amigo MSc. Walter Ricci Filho, grande incentivador para utilização do reator para novos projetos, pesquisas e demais atividades que contribuam com a melhoria das condições de operação e segurança. Aos amigos MSc. José Roberto Berretta, MSc. Alberto de Jesus Fernando, Dr. Waldemir Gutierres Rodrigues, Antonio Luis Pires, Carlos Seiei Nohara, Carlos Alberto Loyola, Algeny Vieira Leite, Júlio Benedito Marin Tondin e todos os demais operadores e técnicos que, junto com a equipe da proteção radiológica, sempre, com muita dedicação, deram todo o suporte e apoio.para que os experimentos fossem realizados.

Ao Dr. José Rosa da Silva pelo apoio, incentivo e ajuda nos projetos mecânicos necessários à realização deste trabalho e ao colega Orlando Nogueira da Silva pelos serviços de desenhista e projetista.

Ao Centro de Química e Meio Ambiente CQMA que forneceram produtos químicos para a decapagem do tubo flexível.

Aos colegas do CTMSP Antonio Nicolau Neumann pela disponibilização de equipamentos para decapagem do tubo flexível, Vadim Surkov pela adequação do SAD com o elemento combustível instrumentado e ao grupo de maquetes que confeccionou uma régua especial para o posicionamento dos termopares nos canais.

Ao Washington de Carvalho Lopes da Gerência de Importação e Exportação do IPEN, pelo empenho e dedicação nos processos de importação.

Ao Dr. Edson Romam pelo empenho no processo de importação dos termopares.

Ao Adilson Aboláfio da Gerência de Aceleradores Ciclotrons pela calibração dos termopares.

Ao Sr. Luiz Angelo e seu filho Dr. Gabriel Angelo, pela usinagem das janelas nas placas suporte laterais e do conector do tubo flexível.

À minha esposa Rosimeire e ao meu filho Gustavo pelo incentivo, carinho, paciência e compreensão durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também a todos os colegas do Centro de Engenharia Nuclear (CEN) que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

# DESENVOLVIMENTODE UM ELEMENTO COMBUSTÍVEL INSTRUMENTADO PARA O REATOR DE PESQUISA IEA-R1

#### Pedro Ernesto Umbehaun

#### **RESUMO**

Após o aumento de potência do reator IEA-R1 de 2 MW para 5 MW observou-se um aumento da taxa de corrosão nas placas laterais de alguns elementos combustíveis e algumas dúvidas surgiram com relação ao valor de vazão utilizada nas análises termohidráulicas. A fim de esclarecer e medir a distribuição de vazão real pelos elementos combustíveis que compõe o núcleo do reator IEA-R1, um elemento combustível protótipo, sem material nuclear, chamado DMPV-01 (Dispositivo para Medida de Pressão e Vazão), em escala real, foi projetado e construído em alumínio. A vazão no canal entre dois elementos combustíveis é muito difícil de estimar ou ser medida. Esta vazão é muito importante no processo de resfriamento das placas laterais. Este trabalho apresenta a concepção e construção de um elemento combustível instrumentado para medir a temperatura real nestas placas laterais para melhor avaliar as condições de resfriamento do combustível. Quatorze termopares foram instalados neste elemento combustível instrumentado. Quatro termopares em cada canal lateral e quatro no canal central, além de um termopar no bocal de entrada e outro no bocal de saída do elemento. Existem três termopares para medida de temperatura do revestimento e um para a temperatura do fluido em cada canal. Três séries de experimentos, para três configurações distintas, foram realizadas com o elemento combustível instrumentado. Em dois experimentos uma caixa de alumínio foi instalada ao redor do núcleo para reduzir o escoamento transverso entre os elementos combustíveis e medir o impacto na temperatura das placas externas.

Dada a tamanha quantidade de informações obtidas e sua utilidade no projeto, melhoria e capacitação na construção, montagem e fabricação de elementos combustíveis instrumentados, este projeto constitui um importante marco no estudo de núcleos de reatores de pesquisa. As soluções propostas podem ser amplamente utilizadas para outros reatores de pesquisa.

# DEVELOPMENT OF AN INSTRUMENTED FUEL ASSEMBLY FOR THE IEA-R1 RESEARCH REACTOR

#### Pedro Ernesto Umbehaun

### ABSTRACT

After the IEA-R1 upgrade from 2 MW to 5 MW it was observed that the corrosion rate increased in a lateral plate of one fuel element and some issues appeared concerning the flow values used in the thermal-hydraulic analysis. In order to clear it up and measure the actual flow distribution among the fuel elements composing the IEA-R1 active core, a dummy element without nuclear fuel material, called DMPV-01 (Pressure and Flow Measurement Device), full scale, was designed and manufactured in aluminum. The flow rate in the channel between two fuel assemblies is very difficult to estimate or measure. This flow rate is very important to the cooling process of the external plates. This work presents the design and construction of an instrumented fuel assembly in order to measure the actual temperature in these lateral plates.

Fourteen thermocouples were installed in this instrumented fuel assembly. Four in each lateral channel, one in the inlet nozzle and one in the outlet nozzle. There are three thermocouples in each channel to measure the clad temperature and one thermocouple to measure the fluid temperature.

Three series of experiments, for three different core configuration were carried out with the instrumented fuel assembly. In two experiments a box was installed around the core to reduce the cross flow between the fuel assembly and measure the impact in the temperatures of external plates.

Given the amount of information generated and its utility in the design, improvement and qualification in construction, assembly and manufacturing of instrumented fuel, this project turned out to be an important landmark on the thermalhydraulic study of research reactor cores. The proposed solutions could be useful for other research reactors.

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	6
3. REVISÃO DA LITERATURA	7
4. MATERIAIS E MÉTODOS	15
4.1 Descrição do reator IEA-R1	15
4.1.1 Elemento Combustível Padrão	18
4.1.2 Elemento Combustível de Controle	20
4.2 Desenvolvimento do Elemento Combustível Instrumentado (ECI)	22
4.2.1 Protótipo do Elemento Combustível Instrumentado	23
4.2.2 Elemento Combustível Instrumentado	27
4.3 Programas utilizados nas análises termo-hidráulicas	31
4.3.1 Código PARET-ANL	31
4.3.2 Programa MTRCR-IEAR1	32
4.4 Sistema de aquisição de dados do Reator IEA-R1 (SAD-IEA-R1)	32
4.4.1 Calibração dos termopares	33
5. RESULTADOS	
5.1 Descrição do Experimento para a configuração 243	36
5.2 Descrição do Experimento para a configuração 245	
5.2.1 Configuração 245 sem a caixa	
5.2.2 Configuração 245 com a caixa	42
5.3 Descrição do experimento para a configuração 246	45
5.3.1 Configuração 246 com a caixa	47

5.3.2 Configuração 246 sem a caixa	48
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
6.1 Análise e discussão dos resultados para os experimentos na configuração 243	51
6.1.1 Considerações iniciais	51
6.1.2 Balanço de massa e energia	57
6.1.3 Análise das temperaturas de revestimento	64
6.2 Análise e discussão dos resultados para os experimentos na configuração 245	71
6.2.1 Considerações iniciais	71
6.2.2 Balanço de massa e energia	72
6.2.3 Análise das temperaturas de revestimento	77
6.3 Análise e discussão dos resultados para os experimentos na configuração 246	85
6.3.1 Considerações iniciais	85
6.3.2 Balanço de massa e energia	86
6.3.3 Análise das temperaturas de revestimento	88
6.4 Análise de um canal quente hipotético	95
7 CONCLUSÃO	96
REFERÊNCIAS	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Parâmetros dos ECs padrão e de controle	22
Tabela 4.2 Posição e distribuição dos termopares nos canais	28
Tabela 4. 3 Calibração dos termopares do Elemento Combustível Instrumentado	34

Tabela 6.1 Temperatura média para os diferentes níveis de potência - CONF 243	53
Tabela 6.2 Densidade de potência axial normalizada	57
Tabela 6.3 Comparação entre a potência calculada e a potência medida	58
Tabela 6.4 Comparação PARET e MTRCR-IEAR1 com os valores experimentais	60
Tabela 6.5 Temperatura média registrada no intervalo e desvio padrão	62
Tabela 6.6 Condutância térmica dos canais centrais para as configurações 243, 245 e 246	64
Tabela 6.7 Principais resultados experimentais para a configuração 245	72
Tabela 6.8 Densidade de potência axial normalizada	73
Tabela 6.9 Registro dos termopares para o canal central	79
Tabela 6.10 Temperatura média registrada no intevalo 2500-2600 s	85
Tabela 6.11 Distribuição de potência axial normalizada	86

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1 Oxidação na Placa lateral de um EC do IEA-R1[6]	2
Figura 1. 2 Dispositivo para Medida de Pressão e Vazão (DMPV-01)	3
Figura 1. 3 Distribuição de Vazão nos canais Internos do Elemento Combustível	4
	-
Figura 3. 1 Caixa de alumínio montada na placa matriz do reator FRG-1	
Figura 3. 2 Posição dos termopares a partir da entrada do canal [21]	9
Figura 3. 3 Seção transversal do ECI e a localização da placa instrumentada [21]	9
Figura 3.4 Seção transversal do dispositivo IRIS [24]	10
Figura 3.5 Detalhe da montagem do termopar no revestimento da placa combustível [24]	10
Figura 3.6 Fusão de um elemento combustível após transiente de inserção de reatividade [23]	11
Figura 3. 7 Núcleo de um dos reatores após a simulação de um acidente [23]	12
Figura 3.8 Detalhe da instalação do termopar no cerne da placa combustível [23]	12
Figura 3.9 Detalhe da soldagem do termopar na superfície da placa combustível [23]	13
Figura 3.10 ECI com termopares na placa combustível lateral [23]	14

Figura 4.1 Núcleo do reator e estrutura de sustentação [1]	15
Figura 4. 2 Vista superior esquemática do núcleo do reator IEA-R1 [1]	16
Figura 4.3 Esquema do circuito de resfriamento do núcleo do reator IEA-R1 [14]	
Figura 4. 4 Elemento combustível do IEA-R1 [1], [26]	19
Figura 4. 5 Elemento Combustível de controle do IEA-R1 [1]	21
Figura 4.6 Riscos que poderiam danificar a superfície da placa	24
Figura 4.7 Termopares instalados na pastilha de alumínio	25
Figura 4.8 Posicionamento da pastilha sobre a placa	26
Figura 4.9 Posicionamento das placas suporte	27
Figura 4. 10 Posição dos termopares no ECI	29
Figura 4. 11 Elemento combustível instrumentado	
Figura 4. 12 Detalhe do bocal superior	31
Figura 4. 14 Tela do Sistema de Aquisição de Dados desenvolvida para o ECI	

Figura 6.1 Representação esquemática das placas, canais e localização dos termopares	51
Figura 6.2 Temperaturas registradas com reator desligado e bomba em operação	
Figura 6.3 Temperaturas no revestimento na posição 252,5 mm da entrada do canal	54
Figura 6.4 Temperaturas no revestimento na posição 432,5 mm da entrada do canal	54
Figura 6.5 Temperaturas no revestimento na posição 552,5 mm da entrada do canal	55
Figura 6.6 Diferenças de temperatura entre as placas laterais e central	55
Figura 6.7 Temperaturas do fluido nos bocais de entrada e saída	56
Figura 6.8 Temperatura de entrada no ECI	61
Figura 6.9 Comportamento das temperaturas no ECI com o reator operando 3,5 MW- Conf-243	62
Figura 6.10 Contato entre o revestimento e a pastilha	63
Figura 6.11 Representação de um canal central	65
Figura 6.12 Comparação das temperaturas dos termopares com as calculadas	66
Figura 6.13 Representação do canal lateral	66
Figura 6.14 Comparação das temperaturas dos termopares com as calculadas	67
Figura 6.15 Comportamento das temperaturas no canal com redução de 75% da vazão no canal exter	no68
Figura 6.16 Representação do canal lateral	69
Figura 6.17 Comparação das temperaturas dos termopares com as calculadas	70
Figura 6.18 Comportamento das temperaturas no canal com redução de 75% da vazão no canal exter	no70
Figura 6.19 Respostas dos termopares com o reator desligado e a bomba em operação	71
Figura 6.20 Temperaturas ao longo do canal com e sem a caixa ao redor do núcleo	74
Figura 6.21 Temperaturas do núcleo no transiente de parada de bomba	75
Figura 6.22 Comportamento da temperatura dos termopares sem a caixa	76
Figura 6.23 Comportamento da temperatura dos termopares com a caixa	76
Figura 6. 24 Representação esquemática de um canal central	77
Figura 6.25 Comparação dos valores medidos e calculados sem a caixa	78
Figura 6.26 Comparação dos valores medidos e calculados com a caixa	78
Figura 6.27 Representação do canal lateral	79
Figura 6.28 Comparação da temperatura dos termopares com as calculadas	

Figura 6.29 Temperaturas após redução de 80% da vazão no canal externo	81
Figura 6.30 Comparação da temperatura dos termopares com as calculadas após a instalação de	1 caixa82
Figura 6.31 Representação do canal lateral	
Figura 6. 32 Comparação da temperatura dos termopares com as calculadas antes da instalação	da caixa 83
Figura 6.33 Temperaturas antes da instalação da caixa e redução de 70% na vazão	84
Figura 6.34 Temperaturas após a instalação da caixa	
Figura 6.35 Temperatura com o reator desligado e a bomba em operação	85
Figura 6.36 Temperaturas ao longo do canal com e sem a caixa ao redor do núcleo	87
Figura 6.37 Temperatura durante transiente de parada de bomba	
Figura 6.38 Representação esquemática do canal central	
Figura 6.39 Temperaturas após a instalação da caixa ao redor do núcleo	90
Figura 6.40 Temperaturas após a retirada da caixa ao redor do núcleo	90
Figura 6.41 Representação esquemática do canal	91
Figura 6.42 Temperaturas após a instalação da caixa ao redor do núcleo	92
Figura 6.43 Temperaturas com a caixa e redução de 30% na vazão do canal externo	92
Figura 6.44 Comparação da temperatura dos termopares com as calculadas sem a caixa	93
Figura 6.45 representação esquemática do canal	
Figura 6.46 Temperaturas após instalação da caixa ao redor do núcleo	94
Figura 6.47 Comparação da temperatura dos termopares com as calculadas sem a caixa	94
Figura 6.48 Temperaturas calculadas para um canal quente	

## 1. INTRODUÇÃO

Em 1995, o IPEN-CNEN/SP deu início ao projeto de aumento de potência do reator IEA-R1de 2 MW para 5 MW, [1] e [2]. Os principais pontos deste projeto foram concluídos em 1997. Durante os vários anos de operação do reator a 2 MW, com um núcleo constituído por 26 elementos combustíveis e 4 elementos de controle, as margens de segurança termo-hidráulicas, em relação aos limites de projeto, foram sempre muito elevadas, mesmo com todas as margens de segurança adotadas nas análises [3] e [4]. No entanto, as análises termo-hidráulicas para o núcleo com redução do número de elementos combustíveis, ou seja, um núcleo menor, com apenas 20 elementos combustíveis e 4 elementos de controle na potência de 5 MW, constatou-se que análises mais criteriosas e elaboradas se faziam necessárias. As margens de segurança haviam sido reduzidas em decorrência do aumento do fluxo de calor nas placas combustíveis. A metodologia de análise conservativa até então utilizada poderia inviabilizar a operação segura do reator neste novo nível de potência, [5].

As análises realizadas até então para a potência de 2 MW resultavam em margens de segurança elevadas. Desta forma, desconsiderar os desvios de vazão do núcleo ativo pelos vários dispositivos, furos e acoplamentos não era significativo.

Após a redução do núcleo ativo do reator e aumento da potência para 5 MW, através de inspeções visuais, constatou-se um aumento na oxidação das placas laterais, indicando temperaturas elevadas nas mesmas. A Figura 1.1 mostra a imagem, obtida com o sistema de inspeção visual, de uma placa lateral com oxidação mais acentuada na região central de um elemento combustível (EC) [6].



Figura 1. 1 Oxidação na Placa lateral de um EC do IEA-R1[6]

No caso específico do reator IEA-R1, constatou-se que o número de irradiadores era relevante e que a vazão pelos mesmos deveria ser considerada indicando a necessidade do estabelecimento de uma nova metodologia para a estimativa da distribuição de vazão no núcleo.

A dissertação de mestrado de Umbehaun [5] propõe uma nova metodologia para o cálculo do resfriamento de canais de reator e para o cálculo da distribuição de vazão em núcleos de reatores de pesquisa. A análise do resfriamento de canais utiliza o programa MTRCR-IEAR1 (Modelo Térmico do Resfriamento de Canais do Reator IEA-R1) baseado no pacote comercial *Engineering Equation Solver*, EES [7]. O MTRCR-IEAR1 permite a análise termo-hidráulica de núcleos de reatores de pesquisa em condições nominais de operação e foi validado contra os resultados obtidos com os códigos COBRA [8] e PARET [9]. O MTRCR-IEAR1 permite ainda a avaliação de canais com diferentes vazões de resfriamento e diferentes potências nas placas combustíveis. As análises feitas com este programa foram de fundamental importância na decisão, temporária, de redução da

densidade de urânio, e consequentemente de potência, nas placas laterais dos elementos combustíveis.

A metodologia proposta para a estimativa da distribuição de vazão utiliza o programa FLOW, que foi validado experimentalmente [10], [11], [12] e [13] para o reator IEA-R1. No programa FLOW, além das vazões pelos elementos combustíveis e de controle, foi considerada a vazão que passa pelos diversos irradiadores, pelos canais laterais existentes entre elementos combustíveis e irradiadores e pelos furos principais e secundários da placa matriz, permitindo assim uma avaliação mais precisa da influência de cada um deles no resfriamento do núcleo. A vazão estimada admite escoamento apenas na direção vertical descendente. Na realidade esta é uma simplificação que, de fato não ocorre, uma vez que as laterais do núcleo do reator são abertas e a vazão estimada para os canais entre irradiadores e elementos combustíveis, pode ter uma parcela entrando pelas laterais do núcleo, comprometendo o resfriamento das faces externas das placas laterais. Uma análise dessa situação é apresentada na análise dos resultados do presente trabalho.

Com o objetivo de sanar algumas questões relativas ao resfriamento dos elementos combustíveis, um elemento protótipo instrumentado para medidas de pressão e vazão, denominado DMPV-01, [14], foi desenvolvido para medir a distribuição de vazão no núcleo do reator e nos canais internos do EC, Figura 1. 2



Figura 1. 2 Dispositivo para Medida de Pressão e Vazão (DMPV-01)

Esse elemento foi ensaiado na Bancada de Aferição de Vazão (BAV), obtendo-se dados para ajustar uma curva de calibração de vazão versus queda de pressão[14]. A BAV também foi utilizada para experimentos com os principais componentes do núcleo do reator.

Nesta bancada foi medida também a distribuição de vazão entre os canais internos do EC e comprovou-se que a distribuição de vazão pelos canais internos não é uniforme. .A vazão nos canais mais externos é de 10 a 15% menor que a vazão média, dependendo da vazão total pelo EC. No canal central a vazão é 8% maior, se comparada com a vazão média no EC, Figura 1.3. Isso confirmou deficiências no resfriamento das placas laterais, porém este fato isolado não justifica por completo a oxidação acentuada.



Figura 1. 3 Distribuição de Vazão nos canais Internos do Elemento Combustível

Posteriormente, o DMPV-01 foi colocado no núcleo do reator IEA-R1, em diferentes posições da placa matriz, substituindo um EC padrão, com o objetivo de verificar a distribuição de vazão nas várias posições do núcleo. Concluiu-se que, a distribuição de vazão no núcleo é praticamente uniforme, ou seja, a variação de vazão entre um EC numa posição central e outro numa posição periférica do núcleo foi de 4%.

A introdução deste elemento no núcleo do reator permitiu também verificar que a vazão total por EC era significativamente menor que o valor estimado. A partir daí, uma série de inspeções e análise de documentos permitiram identificar que o motivo desta baixa vazão se devia a fuga por furos não tamponados da placa matriz, irradiadores com vazão muito acima da necessária e até erro na curva de calibração do bocal de vazão para medida de vazão no circuito primário. Com a solução destes problemas a vazão total por EC aumentou em cerca de 30%.

No entanto, apesar deste aumento de vazão, o problema de oxidação nas placas laterais persistiu, reforçando a hipótese que o problema de resfriamento das placas laterais era devido à falta de resfriamento pelo lado externo, ou seja, baixa vazão nos canais entre elementos combustíveis.

Para avaliar e comprovar a deficiência de resfriamento das placas laterais foi proposto a construção de um elemento combustível instrumentado, no qual foram instalados termopares nos canais laterais e no canal central, conforme será apresentado neste trabalho.

### 2. OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é o desenvolvimento de um elemento combustível padrão instrumentado, tipo placa, para avaliação termo-hidráulica do resfriamento das placas combustíveis, principalmente das placas laterais, que formam os canais entre elementos adjacentes, e desta forma fornecer informações, não disponíveis na literatura, para melhorias de projeto, construção e condições de operação de núcleos de reatores de pesquisa.

Este projeto tem como principal agente motivador, apontar, através de experimentos, as deficiências das condições de resfriamento das placas laterais do combustível do reator IEA-R1 e propor uma solução, garantindo assim melhorias nas margens de segurança para a operação a 5 MW.

## 3. REVISÃO DA LITERATURA

Embora a revisão da literatura esteja ao longo de todo o documento, neste item apresentam-se e discutem-se os trabalhos mais relevantes da literatura, específicos de projeto e concepção de elementos combustíveis instrumentados.

Uma possível solução para garantir resfriamento adequado nos canais entre elementos combustíveis seria a colocação de uma restrição em torno do núcleo, impedindo assim o escoamento transverso, forçando um escoamento unidimensional e descendente em todo o núcleo.

Provavelmente este tenha sido o motivo da colocação de uma caixa de alumínio ao redor do núcleo do reator alemão FRG-1, [15], conforme mostra a Figura 3.1, após a redução do núcleo de 24 para 12 elementos combustíveis.



Figura 3. 1 Caixa de alumínio montada na placa matriz do reator FRG-1

O projeto do elemento combustível do reator chileno RECH-1, [16], que possui as placas laterais com apenas 50% da densidade de urânio é outro fato que reforça a

hipótese que o resfriamento das placas laterais de reatores de pesquisa tipo piscina é menor.

Estudos neutrônicos e termo-hidráulicos demonstram que a redução da densidade de urânio nas placas laterais, [15], [16] e [17], pode reduzir a oxidação. Embora esta redução de urânio implique também em redução de queima final do EC, em torno de 3% [16], esta solução foi adotada para os elementos combustíveis, de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>-Al de 2,3 g U/cm<sup>3</sup>, produzidos no IPEN no período de 2002 a 2008. Neste período, não se observou mais oxidação durante as inspeções visuais realizadas nestes elementos combustíveis.

A partir de 2008, com a substituição do trocador de calor do circuito primário do reator IEA-R1, a vazão de operação pôde ser aumentada de 3000 para 3400 gpm, e as placas laterais dos elementos combustíveis voltaram a ser fabricadas com a mesma densidade de urânio das placas internas, ou seja, 100% da densidade.

Na literatura especializada encontram-se poucas publicações com resultados de elementos combustíveis instrumentados tipo MTR.

Em 1970, foram publicados resultados experimentais de elemento combustível instrumentado, [20], com placas curvas, para a condição de operação normal e para a condição de circulação natural. Este elemento combustível instrumentado de alto enriquecimento (90%) foi desenvolvido para o reator holandês de alto fluxo neutrônico HFR (High Flux Reactor) para medir temperatura de fluido e revestimento, fluxo neutrônico e vazão. A placa onde foram soldados os 5 termopares tipo *Chromel-Alumel* é uma placa interna e, portanto, não é mencionado nenhum tipo de análise ou deficiência de resfriamento nas placas laterais, até porque este tipo de combustível opera com altas velocidades de escoamento nos canais o que reduziria um eventual problema deste tipo.

Em 1998, Sevdik [21] publicou um trabalho no qual apresenta um EC instrumentado para medida de temperaturas e fluxo de nêutrons. Este elemento foi desenvolvido para o reator TR-2 (Turkish Reactor) que é muito semelhante ao reator IEA-R1. Neste EC foram instalados cinco termopares do tipo K *Chromel-Alumel* com diâmetro de 0,5 mm, porém dois deles (TC3 e TC5) apresentaram falha, provavelmente durante o processo de soldagem. A Figura 3. 2 apresenta a localização dos termopares na placa combustível e a Figura 3.3 mostra que os mesmos foram instalados na segunda placa combustível, primeiro canal de resfriamento.



Figura 3. 2 Posição dos termopares a partir da entrada do canal [21]



Figura 3. 3 Seção transversal do ECI e a localização da placa instrumentada [21]

Em 2005, foram apresentados resultados experimentais de medida de temperatura em placas combustíveis planas, paralelas e em escala real. Estes resultados foram obtidos com o dispositivo IRIS, [23] e foi irradiado no reator OSIRIS [24]. Este dispositivo é constituído de oito placas planas sendo quatro de  $U_3Si_2$  e quatro de alumínio, Figura 3.4. Neste dispositivo apenas uma placa combustível e uma de alumínio são instrumentadas. A placa combustível instrumentada é uma placa interna, num canal fechado, onde as condições de resfriamento são bem definidas.



Figura 3.4 Seção transversal do dispositivo IRIS [24]

Os termopares do tipo *Chromel-Alumel*, com diâmetros de 0,2, 0,34 e 1,0 mm foram instalados numa ranhura do revestimento da placa combustível e posteriormente cobertos por uma fita de alumínio, Figura 3.5.



Figura 3.5 Detalhe da montagem do termopar no revestimento da placa combustível [24]

Este dispositivo, além da aquisição das temperaturas em tempo real, permite também a medida do fluxo de nêutrons ao longo do canal enquanto o reator está em operação.

Uma das placas combustíveis é removível, o que permite que sejam feitas medidas de espessura da placa (inchamento), medida da queima do elemento combustível, através de espectrometria gama, inspeções visuais de forma a identificar eventuais pontos de corrosão e análise química da camada de óxido, formada na superfície da placa combustível.

Após a queima das placas combustíveis, as mesmas foram encaminhadas para testes destrutivos para análise microestrutural, para observar formação de porosidade, queima de urânio, contato entre o cerne e o revestimento, queima de urânio na placa, entre outros.

Portanto, este é o dispositivo mais completo, pois além de fornecer dados experimentais para qualificação de códigos de termo-hidráulica, neutrônica e de queima de combustível, permite também qualificação de todo o processo de fabricação.

Em 2006, Day [23] descreve o trabalho desenvolvido para criar um banco de dados experimentais para análise de acidentes em reatores de pesquisa tipo MTR. Devido à natureza potencialmente destrutiva dos testes, os mesmos foram conduzidos na Estação Nacional de Testes de Reatores (NRTS) no deserto de Idaho.

Devido à severidade dos transientes, que podem levar a fusão do combustível, Figura 3.6, ou até mesmo à destruição do núcleo do reator, Figura 3.7, foram desenvolvidos elementos combustíveis instrumentados com revestimento de alumínio e de aço inox, que tem maior ponto de fusão.



Figura 3.6 Fusão de um elemento combustível após transiente de inserção de reatividade [23]



Figura 3. 7 Núcleo de um dos reatores após a simulação de um acidente [23]

Nestes elementos instrumentados foram utilizados termopares *Chromel-Alumel* com diâmetro de 0,25 mm que foram fixados nas placas combustíveis de três diferentes maneiras. Em uma delas, como está ilustrado na Figura 3.8, o termopar é inserido até o interior do núcleo da placa combustível e fixado com solda.



Figura 3.8 Detalhe da instalação do termopar no cerne da placa combustível [23]

A segunda maneira é fixar o termopar na superfície da placa combustível por meio de solda ponto, Figura 3.9



Figura 3.9 Detalhe da soldagem do termopar na superfície da placa combustível [23]

Finalmente a terceira maneira, semelhante a primeira, é a abertura de um pequeno sulco no revestimento do elemento combustível com a fixação do termopar pouco abaixo da superfície da placa, também por soldagem.

A Figura 3.10 apresenta um elemento combustível instrumentado com os termopares soldados na superfície da placa lateral.



Figura 3.10 ECI com termopares na placa combustível lateral [23]

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Descrição do reator IEA-R1

O reator IEA-R1 é um reator tipo piscina que utiliza elementos combustíveis tipo MTR (Material Testing Reactors) em seu núcleo.

O núcleo ativo do reator é constituído por um conjunto de 24 elementos combustíveis que fica submerso na piscina, e suspenso por meio de uma estrutura metálica, conforme ilustrado na Figura 4.1. O reator é moderado e resfriado com água leve e seu resfriamento se dá pelo escoamento de água no sentido descendente através dos elementos combustíveis do núcleo.



Figura 4.1 Núcleo do reator e estrutura de sustentação [1]

O núcleo do reator contém um arranjo de 20 elementos combustíveis padrão e 4 elementos combustíveis de controle encaixados na placa matriz. Ao redor dos elementos combustíveis estão posicionados os elementos refletores de nêutrons e elementos para irradiação de materiais. Existem quatro posições fixas para elementos combustíveis de controle. Estes elementos combustíveis de controle possibilitam a inserção dos elementos absorvedores. Cada um destes elementos absorvedores contém duas lâminas absorvedoras de nêutrons de Cádmio-Indio-Prata. A placa matriz, ilustrada na Figura 4.2, contém um arranjo de 8 x 10 posições nos quais os constituintes do núcleo são encaixados para os diversos arranjos críticos possíveis.



Figura 4. 2 Vista superior esquemática do núcleo do reator IEA-R1 [1]

O sistema de resfriamento primário do reator IEA-R1 consiste de uma piscina, tubulações, tanque de decaimento, bombas, trocadores de calor, sistema medidor de vazão, distribuidor, válvulas, tanque de decaimento e estruturas, como mostrado esquematicamente na Figura 4.3.

A operação contínua do reator, em potência, é possível através da remoção do calor gerado por fissão com os seguintes sistemas:

- Durante o funcionamento do reator, um sistema de bombas de circulação de água da piscina permite a remoção do calor gerado;
- A água passa através de um trocador de calor que transfere o calor gerado para um sistema de resfriamento secundário;
- O sistema de resfriamento secundário circula a água aquecida por uma das torres de resfriamento, que por sua vez dissipa o calor para a atmosfera;
- A água do circuito primário retorna para a piscina do reator através de um distribuidor, que tem a função de homogeneizar a temperatura na piscina do reator. A água da torre de resfriamento é recirculada através do sistema de resfriamento secundário.

Um sistema pneumático atuado manualmente levanta a válvula de acoplamento do bocal de saída com a placa de matriz de núcleo. Em seguida, a bomba é ativada e a vazão operacional do primário é ajustada. O sistema pneumático é desligado e a válvula de acoplamento é mantida nesta posição por força hidrodinâmica resultante da diferença de pressão. Inicia-se a partida do reator retirando-se inicialmente as barras de segurança e em seguida as barras de controle até atingir a potência de operação. A bomba do circuito primário circula água através do núcleo para remover o calor gerado durante a operação do reator. Em seguida, a água flui através do tanque de decaimento para diminuir a atividade do N<sup>16</sup> antes de entrar no trocador de calor, que transfere o calor para o sistema de resfriamento secundário. Se a vazão no circuito primário diminui abaixo do valor do ponto de ajuste (90%), o reator é automaticamente desligado e a válvula de acoplamento desce por ação da gravidade, e, em seguida, o calor residual é removido por circulação natural na piscina.



Figura 4.3 Esquema do circuito de resfriamento do núcleo do reator IEA-R1 [14]

## 4.1.1 Elemento Combustível Padrão

Cada EC padrão [1] e [26], mostrado na Figura 4.4 é constituído por um conjunto de 18 placas combustíveis fixadas em duas placas suporte laterais, formando assim 17 canais fechados de escoamento. Na extremidade inferior é montado o bocal que é encaixado na placa matriz e na extremidade superior é montado um pino para a movimentação do mesmo na piscina do reator.



<u>A - A</u>

### Elemento Combusível Padrão

Figura 4. 4 Elemento combustível do IEA-R1 [1], [26]

### 4.1.2 Elemento Combustível de Controle

Cada EC de controle [1], mostrado na Figura 4.5, é formado por um conjunto de 12 placas combustíveis fixadas por duas placas suporte laterais, duas placas guias externas, duas placas guias internas e um amortecedor de queda do elemento absorvedor de nêutrons. Na extremidade inferior é montado o bocal que será encaixado na placa matriz e na extremidade superior é montado um pino para a manipulação do mesmo na piscina do reator.

As placas suporte laterais do EC de controle possuem comprimentos maiores que as do EC padrão, pois além de fixar as placas combustíveis alojam e guiam as lâminas das barras de controle em todo o seu percurso durante sua movimentação, através das ranhuras especialmente projetadas para esta finalidade. Além das ranhuras, duas placas guias (uma interna e outra externa), são fixadas às placas suportes laterais, formando um canal para a movimentação das lâminas do elemento absorvedor de nêutrons.

As placas guias têm a função, também, de proteger as placas combustíveis adjacentes e manter uniformes seus canais de refrigeração. A ranhura central, existente na placa suporte lateral, é que guia, efetivamente, a lâmina do elemento absorvedor de nêutrons.



CORTE A - A



Figura 4. 5 Elemento Combustível de controle do IEA-R1 [1]

A Tabela 4.1 resume os principais parâmetros e margens de segurança dos elementos combustíveis padrão e de controle.

Tubbla III Tulunetios uos Los pudius	e de controle	
Parâmetro		Observação
Numero de placas combustíveis		
Elemento Combustível Padrão	18	
Elemento Combustível de Controle	12	
Dimensões das placas		
Combustível (cerne)	0,76 mm	espessura
Revestimento	0,38 mm	espessura
Espessura total	1,52 mm	espessura
Largura total da placa	67,1 mm	
Área de escoamento	$193,92 \text{ mm}^2$	
Largura ativa	62,6 mm	
Altura total da placa	625,0 mm	
Altura ativa	600,0 mm	
Dimensões do cerne da placa	$0,76 \times 62,6 \times 600$	Esp. x Larg. x Alt. (mm)
combustível		
Espessura do canal de resfriamento	2,89 mm	
Temperatura Máxima na superfície	95 °C	
do revestimento		
Margem para Instabilidade de Fluxo	2,0	
Margem para ONB (Onset Nucleate	1,3	
Boiling)		
MDNBR ( Minimum Departure	2,0	
Boiling Rate)		

Tabela 4.1 Parâmetros dos ECs padrão e de controle

As margens de segurança não serão verificadas neste trabalho, uma vez que as mesmas devem ser verificadas para o canal quente e o ECI não operou nestas condições em nenhum experimento.

#### 4.2 Desenvolvimento do Elemento Combustível Instrumentado (ECI)

A concepção de um elemento combustível instrumentado (ECI) protótipo, em escala 1:1 para o reator IEA-R1 foi desenvolvido para verificar as reais condições de resfriamento das placas laterais. A Agência Internacional de Energia Atômica - IAEA, forneceu apoio financeiro parcial através de um projeto de pesquisa coordenado, "Safety Significance of Postulated Initiating Events for Different Research Reactor Types and Assessment of Analytical Tools", CRP.

Para o desenvolvimento do ECI, em 2004 iniciou-se a construção de um protótipo em escala 1:1 e com placas de alumínio. A construção deste protótipo teve por objetivo avaliar vários aspectos, principalmente com relação à montagem mecânica e detalhes para alterações mínimas do projeto original, visando a instalação de toda a instrumentação para medida de temperatura. Tal avaliação consistiu na fase preliminar para a construção do ECI propriamente dito, para ser colocado no núcleo do reator para a medida da temperatura ao longo das duas placas laterais e uma placa central, bem como para a medida de temperatura do fluido na entrada e saída dos respectivos canais.

### 4.2.1 Protótipo do Elemento Combustível Instrumentado

Desde o início, as maiores preocupações na construção do elemento combustível instrumentado foram:

 a) Manter todas as características físicas e geométricas de um elemento combustível padrão, de forma que uma vez colocado no núcleo reproduzisse as mesmas condições operacionais dos demais EC.

b) O contato dos termopares de *Chromel-Alumel*, com camisa de aço inox, com a superfície do revestimento, com o tempo, ocasionaria a falha do revestimento por corrosão galvânica, e consequente vazamento de material radioativo para a água da piscina. Para algumas instalações que estão preparadas até para simular acidentes, este não é um problema, como apresentado na revisão da literatura. No caso do reator IEA-R1, a falha de um elemento combustível com vazamento de material radioativo para a água é um problema sério, pois não há local apropriado para armazená-lo fora da piscina, e não há com desmontar o EC para isolar apenas a placa falhada. Além disso, o sistema de tratamento de água não tem capacidade e nem foi projetado para tal evento. A solução encontrada foi montá-los dentro de pastilhas e instalá-las dentro dos canais entre duas placas combustíveis.

A montagem deste elemento protótipo teve por objetivo comprovar a viabilidade de construção de um elemento combustível padrão instrumentado, sem a ocorrência de danos na superfície da placa combustível (riscos), Figura 4.6, e sem danos aos termopares.

Os termopares utilizados foram do tipo K, não aterrados, com 0,5 mm de diâmetro e cabos com 10 m de comprimento.

Optou-se por instalar os termopares dentro de pastilhas de alumínio 6061, mesmo material do revestimento das placas, evitando assim o contato direto do termopar com o revestimento das placas combustíveis de forma a prevenir corrosão galvânica que poderia levar a falha no revestimento. Além disso, o alumínio é um excelente condutor de calor.
A largura nominal do canal de água é 2,89mm e várias espessuras para a pastilha foram testadas. Esta operação é muito delicada, pois, pode riscar a placa superior durante a montagem e não são permitidos riscos com profundidade superior a 80 µm.



Figura 4.6 Riscos que poderiam danificar a superfície da placa

Os canais de resfriamento dos elementos combustíveis têm 2,89 mm de espessura e 62,6 mm de largura. Portanto, optou-se por montar os termopares em pastilhas com 10 mm de diâmetro de forma a não interferir significativamente no escoamento do fluido e 3 mm de espessura, uma vez que, para esta espessura, ficou comprovado durante os testes de montagem que a profundidade dos riscos estavam muito abaixo do limite de 80  $\mu$ m, além de garantir que, após o cravamento das placas combustíveis as mesmas ficassem pressionadas entre duas placas combustíveis.

A Figura 4.7 mostra a montagem de uma pastilha de alumínio com dois termopares, um para medida da temperatura do revestimento e outro para a medida da temperatura do fluido. As bordas destas pastilhas foram levemente arredondadas para facilitar a montagem e reduzir eventuais danos à superfície do revestimento das placas combustíveis.



Figura 4.7 Termopares instalados na pastilha de alumínio

A Figura 4.8 mostra como os termopares foram posicionados na placa combustível com o auxílio de uma régua especial, e os cabos dos termopares encaminhados pela folga existente entre a placa suporte e a placa combustível através de janelas abertas na placa suporte lateral.

No projeto original do elemento combustível a folga entre a placa combustível e a placa suporte lateral é de apenas 0,25 mm, o que não é suficiente para a passagem dos cabos.

Testes de montagem com placas de menor largura, redução de 0,5 mm, 1,0 mm e 0,8 mm, foram realizados para encontrar a largura ideal para a montagem. Uma redução de 0,8 mm na largura total da placa mostrou-se suficiente para a passagem dos cabos dos termopares com facilidade durante o processo de montagem e sem comprometer o processo de cravamento das placas. Esta foi a única alteração dimensional no projeto original do EC, porém sem alterações nas dimensões do canal.



Figura 4.8 Posicionamento da pastilha sobre a placa

A montagem do protótipo seguiu os seguintes passos:

- as duas placas suportes laterais são posicionadas na máquina de montagem; Figura 4.9;
- a placa combustível é encaixada no canal de montagem e deslizada até a posição de montagem. É usado álcool isopropílico como lubrificante para auxiliar na montagem;
- a ferramenta de fixação, rolete, é posicionada e a pressão de montagem é ajustada, o rolete prensa a placa suporte lateral na placa ao longo do comprimento. O rolete é girado de 180°, repetindo-se este passo para o outro lado da placa;
- uma nova placa é posicionada no canal seguinte e o processo se repete até a montagem completa das placas no elemento combustível; e
- para a instalação dos termopares utiliza-se a régua de posicionamento e as janelas de passagem. O encaminhamento dos termopares ocorre juntamente com a placa no canal de montagem.

Após a conclusão da montagem testes foram realizados para confirmar que os termopares não haviam sido danificados.



Figura 4.9 Posicionamento das placas suporte

### 4.2.2 Elemento Combustível Instrumentado

Para o ECI apresentado neste trabalho, foram adquiridos 15 termopares tipo K com camisa de aço inox não aterrados de 0,5 mm de diâmetro e comprimento de cabo de 10 m. Os termopares foram assim distribuídos no elemento combustível: quatro em cada canal lateral, quatro no canal central e mais três termopares para medida das temperaturas do fluido, um no bocal de entrada (T1) e dois no bocal de saída (T14 e T15). No primeiro canal lateral são três termopares para medida da temperatura da superfície em três posições distintas (T2, T5 e T8) e um termopar para medida da temperatura do fluido (T9) próximo à saída do canal. No outro canal lateral são três termopares para medida da temperatura da superfície em três posições distintas (T4, T7 e T12) e um termopar para medida da temperatura do fluido (T13) próximo à saída do canal. No canal central há também três termopares para medida da temperatura da superfície em três posições distintas (T3, T6 e T10) e um termopar para medida da temperatura do fluido (T13, T6 e T10) e um termopar para medida da temperatura do fluido (T14, T7 e T12) e um termopar para medida da canal. A Tabela 4.2 apresenta a localização dos termopares em cada canal a partir da entrada do canal de refrigeração e na Figura 4.10 tem-se uma visão geral do ECI.

Posição a partir da	Canal lateral	Canal central	Canal lateral
entrada do canal (mm)	direito		esquerdo
	Temperaturas d	e revestimento	-
252,5	T2	Т3	T4
432,5	T5	T6	Τ7
552,5	T8	T10	T12
	Temperatura	s de Fluido	
552,5	Т9	T11	T13
T1: Temperatura de entrada	a do fluido, T14 e 15	: Temperatura de saíd	a do fluido

Tabela 4.2 Posição e distribuição dos termopares nos canais



Figura 4. 10 Posição dos termopares no ECI

A Figura 4.11 mostra o elemento combustível instrumentado montado.



Figura 4. 11 Elemento combustível instrumentado

A Figura 4.12 mostra um detalhe do bocal superior do elemento combustível instrumentado sem o pino de movimentação, onde foi instalado um conector com o tubo flexível por onde passam os cabos dos termopares. Este tubo flexível conduz os termopares para fora da piscina onde é feita a conexão com o sistema de aquisição de dados, além de protegê-los durante a movimentação do mesmo dentro da piscina. Observe que há um pino removível para manter o tubo flexível encaixado dentro do conector. A justificativa deste pino é que, após a queima do EC, este pino pode ser removido desacoplando o tubo flexível do conector, permitindo assim que os cabos dos termopares possam ser cortados e o elemento combustível possa ser armazenado na própria piscina com os demais ECs e o tubo flexível levado para o setor de armazenamento de material radioativo.



Figura 4. 12 Detalhe do bocal superior

O ECI é um elemento combustível de  $U_3Si_2$  com 3,0 g U/cm<sup>3</sup> e todas as demais especificações dimensionais, especificações de materiais, composição química das partes estruturais e do combustível utilizados na fabricação deste ECI estão apresentadas em [27].

## 4.3 Programas utilizados nas análises termo-hidráulicas

### 4.3.1 Código PARET-ANL

O código PARET - ANL tem sido usado para as análises termo-hidráulicas em estado estacionário e transiente de reator de pesquisa. PARET - ANL foi originalmente desenvolvido pelo INEL (Idaho National Engineering Laboratory) e, mais tarde melhorado pela ANL (Argonne National).

Este código é uma ferramenta computacional muito utilizada para análises termohidráulicas, com neutrônica acoplada para reatores de pesquisa. Um modelo simplificado é incluído para estimar a fração de vazio produzido por ebulição sub-resfriada.

Este código permite o cálculo das temperaturas de parede em regime monofásico e bifásico. A correlação Bergles – Rohsenow [28] permite o cálculo da temperatura da parede durante o regime de ebulição nucleada plenamente desenvolvida.

O código foi validado contra resultados experimentais obtidos em testes de transitórios em pequenos reatores no programa experimental americano Spert. A comparação com os dados experimentais foi bastante favorável.

#### 4.3.2 Programa MTRCR-IEAR1

O programa MTRCR-IEAR1 é um modelo desenvolvido com o programa comercial Engineering Equation Solver (EES). O MTRCR-IEAR1 permite a análise termohidráulica em estado estacionário, como as realizadas pelos códigos COBRA - 3C – RERTR e PARET-ANL, e também permite analisar canais paralelos de elementos combustíveis com diferentes vazões de resfriamento e diferentes geometrias. Para análises em estado estacionário, o MTRCR-IEAR1 mostra boa concordância com os resultados do COBRA – 3C/RERTR e PARET-ANL. Esta metodologia é utilizada a análise termohidráulica do núcleo do reator de pesquisa IEA-R1.

O MTRCR-IEAR1 é basicamente um conjunto de equações de equilíbrio de fluxo de calor, que juntamente com as correlações para o cálculo do coeficiente de transferência de calor, número de Reynolds, número de Prandt e condições de contorno estabelecidas definem o modelo.

As análises termo-hidráulicas, em condições normais de operação, fornecem os valores dos seguintes parâmetros: velocidade crítica do fluido refrigerante, fluxo de calor para o qual se tem o início da ebulição nucleada, condições para instabilidades no escoamento do fluido refrigerante e o fluxo crítico de calor nos diferentes elementos que compõem o núcleo do reator e verificam se estes valores estão dentro dos limites estabelecidos em projeto.

Os resultados experimentais do ECI fornecem a informação para avaliação destes limites.

#### 4.4 Sistema de aquisição de dados do Reator IEA-R1 (SAD-IEA-R1)

O Sistema de Aquisição de Dados do Reator IEA-R1 (SAD - IEA-R1) foi projetado, montado e instalado pela antiga COPESP (Coordenadoria para Projetos Especiais), atualmente CTMSP (Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo). Este sistema tem por objetivo registrar e monitorar os principais parâmetros de operação do reator. Esta monitoração é feita em redundância a já existente na Sala de Controle do reator.

O sistema faz a aquisição destes sinais e apresenta os dados em uma Interface Homem-Máquina; IHM. Estes valores são comparados com os valores limite e, caso o ultrapassem, a ocorrência será informada, porém sem vínculo com o sistema de proteção do reator. O sistema permite também a geração de relatórios de operação, além de gravar todas as varáveis operacionais em um banco de dados.

Este sistema foi reconfigurado por técnicos do CTMSP, de forma a gravar em um arquivo independente todas as temperaturas do ECI, além das vazões do circuito primário e secundário. As variáveis são registradas continuamente a cada 30 s durante a operação do reator e durante a realização de experimentos o tempo de aquisição pode ser alterado para até 1 s.

Uma nova tela, apresentada na Figura 4. 12 foi criada para o acompanhamento em tempo real das temperaturas no ECI.



Figura 4. 13 Tela do Sistema de Aquisição de Dados desenvolvida para o ECI

## 4.4.1 Calibração dos termopares

Os termopares foram calibrados no Laboratório do Centro de Radiofarmácia do IPEN/CNEN-SP para uma faixa de temperatura de 30 °C até 150 °C, cujos dados encontram-se na Tabela 4.3. Os termopares foram calibrados com os cabos para conexão e com os respectivos conectores de forma a eliminar a influência dos mesmos na calibração.

Faixas de	30	30	50	50	70	70	90	90	110	110	130	130	150	150
Temperatura (°C)														
Temperatura	29,1	29,1	50,5	50,4	70,4	70,4	90,2	90,2	110,2	110,2	130,1	130,1	150,1	150,1
do Forno														
Termopar														
1	29,5	29,4	50,6	50,6	70,5	70,6	90,7	90,7	111,1	111,1	131,6	131,6	152,4	152,4
2	29,5	29,4	50,6	50,5	70,5	70,5	90,7	90,7	111,0	111,1	131,5	131,5	152,2	152,2
3	29,5	29,4	50,6	50,5	70,6	70,6	90,7	90,7	111,0	111,1	131,6	131,6	152,2	152,2
4	29,5	29,4	50,6	50,5	70,5	70,5	90,7	90,7	110,9	111,0	131,4	131,5	152,1	152,0
5	29,5	29,4	50,6	50,5	70,6	70,5	90,7	90,7	111,0	111,1	131,5	131,7	152,2	152,2
6	29,5	29,4	50,6	50,5	70,5	70,5	90,8	90,7	110,9	111,1	131,5	131,6	152,1	152,1
7	29,5	29,4	50,6	50,5	70,6	70,5	90,7	90,7	111,0	111,2	131,6	131,8	152,3	152,2
8	29,5	29,4	50,5	50,5	70,5	70,5	90,8	90,7	110,9	111,1	131,4	131,6	152,1	152,0
9	29,5	29,4	50,5	50,5	70,5	70,5	90,7	90,7	110,9	111,0	131,4	131,6	152,1	152,0
10	29,5	29,5	50,5	50,5	70,6	70,6	90,7	90,7	111,0	111,1	131,5	131,7	152,2	152,1
11	29,4	29,5	50,5	50,5	70,6	70,6	90,7	90,7	111,0	111,1	131,5	131,6	152,1	152,1
12	29,4	29,5	50,5	50,5	70,5	70,6	90,7	90,7	111,0	111,1	131,5	131,6	152,1	152,1
13	29,4	29,5	50,5	50,6	70,6	70,7	90,7	90,8	111,1	111,2	131,6	131,7	152,3	152,2
14	29,4	29,5	50,5	50,6	70,5	70,6	90,6	90,6	110,9	111,0	131,4	131,6	152,1	152,0
15	29,4	29,5	50,5	50,6	70,5	70,6	90,6	90,7	110,9	111,0	131,4	131,6	152,1	152,0

Tabela 4. 3 Calibração dos termopares do Elemento Combustível Instrumentado

Todas as medidas realizadas nos diversos experimentos apresentaram valores inferiores a 50 °C, portanto, como pode ser visto na tabela de calibração acima o erro máximo é de 0,4 °C.

### 5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados para três configurações distintas de núcleo do reator IEA-R1. Cada configuração de núcleo caracteriza-se pela introdução de elemento(s) combustível (eis) novos com a retirada de elemento(s) queimado(s) e rearanjos de elementos que permacem no núcleo.

O primeiro experimento, realizado em 12 de março de 2010 durante a opreação número 12 e Configuração 243 do reator, teve como principais objetivos verificar a respostas dos termopares em vários níveis de potência e também durante um transiente de parada de bomba. Neste experimento foi realizada a aquisição dos dados de temperaturas do elemento instrumentado bem como da piscina e a vazão de resfriamento nas potências de 1,0 MW, 2,0 MW, 3,0 MW, 3,5 MW 4,0 MW e 5 MW, seguido de um transiente de parada de bomba numa potência de 3,5 MW.

Como discutido no capítulo 3 deste trabalho, o resfriamento entre dois elementos combustíveis adjacentes pode ser deficiente o que teria levado a instalação de uma caixa ao redor do núcleo do reator FRG-1 e também teria motivado a redução da densidade de urânio nas placas laterais do elemento combustível do reator chileno RECH-1.

Como a vazão nestes canais não é fácil de ser medida, uma vez que são canais abertos, foi projetada uma caixa, com a altura dos elementos combustíveis, de maneira a impedir ou reduzir o escoamento transverso entre elementos combustíveis. Esta é uma caixa semelhante a instalada no reator FRG-1, porém bipartida no sentido vertical, de forma a facilitar a sua instalação e remoção no reator IEA-R1.

Esta caixa foi instalada no núcleo do reator IEA-R1 para a realizar experimentos nas configurações 245 e 246 e avaliar a influência da mesma no resfriamento das placas laterais.

O segundo experimento, realizado em 27 de maio de 2011 durante a opreação número 22 e Configuração 245 do reator, foi dividido em duas etapas, numa primeira sem a caixa e na segunda foi colocada uma caixa ao redor do núcleo para evitar o fluxo de água pelas laterais do mesmo. Nas duas etapas o experimento constituiu da operação do reator a uma potência de 4,0 MW, seguido de um transiente de parada de bomba onde foram feitas as aquisições dos dados de temperatura do ECI bem como da piscina e a vazão da bomba.

O terceiro experimento, realizado em 1 de junho de 2011 durante a opreação número 23 e na Configuração 246, também foi dividido em duas etapas, sendo que na primeira com uma caixa ao redor do núcleo e na segunda foi retirada a caixa. Nas duas etapas do experimento o reator operou a uma potência de 4,0MW e ao final foi simulado um transiente de parada de bomba onde foram feitas as aquisições dos dados de temperatura do ECI bem como da piscina e a vazão da bomba.

## 5.1 Descrição do Experimento para a configuração 243

O primeiro experimento foi realizado logo após a introdução do ECI no núcleo do reator IEA-R1. Neste experimento registrou-se as temperaturas dos termopares instalados no ECI para vários níveis de potência entre 1,0 e 5,0 MW. O ECI foi colocado na posição 87, linha 8 x coluna 7, conforme representado na Figura 5.1.



Figura 5. 1 Configuração 243 do núcleo do reator

A Tabela 5.1 apresenta a posição de todos os elementos combustíveis na placa matriz e a queima de cada um deles.

Nº EC	Posição EC	%Queima	%Queima	Observ.
	na	EC	<b>U-235</b>	
	Placa Matriz			
172	43	36,562	39,25	
174	85	23,104	25,04	
176	64	22,953	24,88	
177	46	24,050	26,05	
178	55	23,898	25,89	
184	67	16,246	17,70	
191	84	36,581	39,15	
193	86	34,246	36,71	
194	77	35,840	38,38	
195	44	35,982	38,53	
196	47	29,345	31,56	
197	53	19,392	21,00	
198	56	37,843	40,47	ECC
199	74	38,506	41,16	ECC "mais queimado"
200	57	19,40	21,04	
201	45	2,025	2,23	
202	75	15,929	17,3	
203	63	13,511	14,75	
204	83	6,713	7,37	
205	66	5,107	5,62	
208	87	0,000	0,00	EC-InstrumentNovo
209	73	0,000	0,00	Novo
211	54	12,205	13,29	ECC
212	76	11,977	13,04	ECC

**Tabela 5.** 1 Queima dos elementos combustíveis / Fevereiro - 2010 CONFIGURAÇÃO – 243 – Início de Vida

A seguir é apresentada a sequência do experimento:

• Inicialmente o reator estava desligado;

• A bomba do circuito primário foi acionada e a vazão foi ajustada para o valor nominal de 772 m<sup>3</sup>/h (3400 gpm);

• Foi iniciado o processo de partida do reator com a retirada sequencial das barras de segurança e controle;

• Ocorreu um desligamento espúrio, não programado, do reator aos 570 s e em seguida retomou-se o procedimento de partida do reator;

• A potência do reator foi estabilizada por cerca de 5 minutos em cada uma das seguintes potências: 3,5 MW, 4,0 MW, 4,5 MW e 5,0 MW;

Em seguida a potência do reator foi reduzida em degraus, operando cerca de 5 minutos nas seguintes potências: 3,5 MW, 3,0 MW, 2,0 MW e 1,0 MW;
E, finalmente, a potência do reator foi novamente elevada para 3,5 MW, e após a estabilização da mesma foi desligada a bomba do primário, forçando assim o desligamento do reator por baixa vazão, aproximadamente 93% da vazao nominal. A Figura 5.2 mostra o registro das temperaturas de acordo com a sequência descrita acima.



Figura 5. 2 Registro das temperaturas do ECI - configuração 243

O ECI foi dividido em três regiões de seis placas combustíveis cada para o cálculo da distribuição axial de fluxo, conforme apresenta a Figura 5.3.



Figura 5. 3 Distribuição axial de potência no ECI na configuração 243



A Figura 5.4 mostra o transiente de queda de vazão da bomba com o tempo.

Figura 5. 4 Curva de queda de vazão da bomba com o tempo

### 5.2 Descrição do Experimento para a configuração 245

### 5.2.1 Configuração 245 sem a caixa

Nesta configuração o ECI foi colocado na posição 63 da placa matriz, linha 6 x coluna 3, entre os elementos combustíveis 197 e 209 conforme representado na Figura 5.5.

Durante a movimentação do ECI da posição 87 para a posição 63 do núcleo, a ferramenta de movimentação de elementos combustíveis danificou o termopar T1, que mede a temperatura de entrada do fluido, causando falha do mesmo.





Figura 5. 5 Configuração 245 do núcleo do reator

A Tabela 5.2 apresenta a posição de todos os elementos combustíveis na placa matriz e a queima de cada um deles.

Nº EC	Posição	EC	%Queima	%Queima	Observ.
	na		EC	U-235	
	Placa Ma	triz			
172	43		40,508	43,37	
174	85		28,723	31,00	
176	87		28,172	30,42	
177	46		29,778	32,12	
178	45		31,377	33,80	
184	66		23,732	25,71	
193	86		39,604	42,31	
195	44		41,608	44,41	
196	47		34,665	37,15	
197	53		24,466	28,52	
200	57		26,621	28,68	
201	55		8,894	9,75	
202	75		24,095	26,10	
203	64		22,046	23,91	
204	83		12,258	23,40	
205	67		13,376	14,61	
206	77		0,0	0,0	EC- Novo
207	84		0,0	0,0	EC - Novo
208	63		7,831	8,59	EC-Instrumentado
209	73		7,428	8,15	
211	54		21,679	23,43	ECC
212	76		21,339	23,07	ECC
220	56		4,474	4,92	ECC
221	74		4,729	5,20	ECC

Tabela 5. 2 Queima dos elementos combustíveis / Início Janeiro - 2011 CONFIGURAÇÃO - 245 - Início de Vida

Na primeira etapa, sem a caixa em torno do núcleo, foi realizado o experimento, com a seguinte sequência:

- O reator estava ligado há 64h e operando a 4 MW quando iniciou-se a aquisição de dados a cada 1s;
- A bomba do primário operava a vazão nominal de 772 m<sup>3</sup>/h, 3400 gpm;
- Temperatura registrada da água da piscina 18,3 °C;
- Aos 1066 s a bomba foi desligada e o reator desligou por baixa vazão, aproximadamente 93% da vazão nominal.

A Figura 5.6 mostra o registro das temperaturas de acordo com a sequência descrita acima.



Figura 5.6 Resultados experimentais sem a caixa de alumínio na configuração 245

# 5.2.2 Configuração 245 com a caixa

Após a conclusão deste experimento foi instalada uma caixa de alumínio ao redor do núcleo para iniciar a segunda etapa.

A Figura 5.7 apresenta o registro das temperaturas para esta etapa de experimento com a caixa ao redor do núcleo.



Figura 5. 7 Resultados experimentais com a caixa de alumínio na configuração 245

O ECI foi dividido em três regiões de seis placas combustíveis cada para o cálculo da distribuição axial de potência, conforme apresenta a Figura 5.8.



Figura 5.8 Distribuição axial de potência no ECI na configuração 245

A Figura 5.9 mostra a vazão ao longo do tempo durante os transientes de parada de bomba para as duas etapas de experimentos realizados para a configuração 245.



Figura 5.9 Curva de queda de vazão da bomba com o tempo

### 5.3 Descrição do experimento para a configuração 246

Nesta configuração o ECI foi mantido na posição 63 na placa matriz, porém agora entre os elementos combustíveis 197 e 202 conforme representado na Figura 5.10.



Figura 5.10 Configuração 246 do núcleo do reator

A Tabela 5.3 apresenta a posição de todos os elementos combustíveis na placa matriz e a queima de cada um deles.

Nº EC	Posição EC	%Queima	%Queima	Observ.
	na	EC	U-235	
	Placa Matriz			
172	43	42,549	45,49	
174	85	31,917	34,37	
176	87	30,695	33,09	
177	46	32,771	35,27	
178	45	34,321	36,90	
184	66	28,318	30,58	
196	47	37,448	40,06	
197	53	30,161	32,42	
200	57	30,449	32,72	
201	55	13,633	14,88	
202	73	28,635	30,91	
203	64	26,950	29,08	
204	83	15,443	16,84	
205	67	17,377	18,92	
206	77	4,183	4,60	
207	84	4,044	4,45	
208	63	12,045	13,17	EC-Instrumentado
209	75	11,579	12,66	
210	44	0,000	0,00	ECC - Novo
211	54	26,590	28,65	ECC
213	86	0,000	0,00	EC - Novo
212	76	26,458	28,51	ECC
220	56	9,365	10,26	ECC
221	74	10,108	11,07	ECC

Tabela 5.3 QUEIMA DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS / Início - Junho - 2011 CONFIGURAÇÃO – 246 – Início de Vida

# 5.3.1 Configuração 246 com a caixa

Numa primeira etapa foi realizado o experimento com a caixa em torno do núcleo, na seguinte sequência:

- O reator inicialmente estava desligado quando se iniciou a aquisição de dados a cada 1s;
- A bomba foi ligada e a vazão nominal foi ajustada em 772 m<sup>3</sup>/h, 3400 gpm, para o circuito primário;
- Foi iniciado o processo de partida do reator com a retirada sequencial das barras de segurança e controle;
- A potência do reator foi estabilizada em 4,0 MW;
- Temperatura registrada da água da piscina 18,3 °C;
- Aos 5030 s a bomba foi desligada e o reator foi desligado por baixa vazão.

A Figura 5.11 mostra o registro das temperaturas de acordo com a sequência descrita acima.



Figura 5.11 Resultados experimentais com a caixa de alumínio na configuração 246

# 5.3.2 Configuração 246 sem a caixa

Após a conclusão deste experimento foi retirada a caixa de alumínio ao redor do núcleo para iniciar a segunda etapa do experimento nesta configuração. A sequência do experimento foi a seguinte:

- O reator inicialmente estava desligado quando e iniciou-se a aquisição de dados a cada 1s;
- A bomba foi ligada e foi ajustada a vazão nominal de 772 m<sup>3</sup>/h, 3400 gpm, para o circuito primário;
- Foi iniciado o processo de partida do reator com a retirada sequencial das barras de segurança e controle;
- A potência do reator foi estabilizada por alguns minutos na potência de 4MW
- Temperatura registrada da água da piscina 20,9 °C;
- Aos 7095 s a bomba foi desligada e o reator foi desligado por baixa vazão.

A Figura 5.12 mostra o registro das temperaturas de acordo com a sequência descrita acima.



Figura 5.12 Resultados experimentais sem a caixa de alumínio na configuração 246

O ECI foi dividido em três regiões de seis placas combustíveis cada para o cálculo da distribuição axial de fluxo, conforme apresenta a Figura 5.13.



Figura 5.13 Distribuição axial de potência para a configuração 246

A Figura 5.14 mostra a vazão ao longo do tempo durante os transientes de parada de bomba para as duas etapas de experimentos realizados para a configuração 246.



Figura 5.14 Curva de queda de vazão da bomba com o tempo

# 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Todos os cáculos neutrônicos e de mudança de configuração aqui apresentados foram realizados pelo grupo de neutrônica do Centro de Reatores de Pesquisas CRPq do IPEN[29], [30] e [31].

A metodologia de análise neutrônica é baseada nos softwares: LEOPARD[32] e HAMMER-TECHNION[33] para geração das seções de choque, o código 2DB[34] para os cálculos de queima do núcleo em uma geometria 2-D e o código CITATION [35] para análise em uma geometria 3-D. A seção de choque do combustível é calculada com o código LEOPARD, versão modificada pela universidade de Michigan, onde a geometria de placa foi incluída, utilizando modelo de célula padrão (combustível, revestimento e moderador) com uma região extra para considerar outras regiões do elemento combustível. O código HAMMER-TECHNION é utilizado para gerar a seção de choque das regiões não combustíveis, tais como refletores e barras de controle, entre outros. O histórico de potência é simulado com o código num modelo 2D. Finalmente, os cálculos tridimensionais são realizados com o CITATION para o fator de multiplicação efetivo, fluxo de neutrons e distribuição de densidade de potência, controle integral e diferencial de posição de barras, coeficientes de reatividade e parâmetros cinéticos.

A Figura 6.1 mostra uma representação esquemática das placas combustíveis e canais que são analisados neste trabalho bem como a localização dos termopares nos respectivos canais.



Figura 6.1 Representação esquemática das placas, canais e localização dos termopares

## 6.1 Análise e discussão dos resultados para os experimentos na configuração 243

## 6.1.1 Considerações iniciais

A Figura 6.2 apresenta um detalhe da Figura 5.2, onde se pode observar que todas as temperaturas se estabilizam em torno de 30 °C após 4 minutos do acionamento da bomba principal, no intervalo de 240 a 260 s, que corresponde à temperatura da água na piscina do reator.



Figura 6.2 Temperaturas registradas com reator desligado e bomba em operação

A temperatura média do fluido refrigerante na entrada do elemento combustível (T1) neste intervalo de tempo é de 29,5 °C e de saída 30,2 °C. A temperatura média do elemento combustível é 29,9 °C (média das medidas T2 a T12), ou seja, uma diferença de 0,34 °C entre o fluido e o combustível. Portanto, considerando que durante a calibração dos termopares, Tabela 4.3, para a temperatura de 30 °C o erro máximo foi de 0,4 °C, pode-se considerar que o elemento combustível está a uma temperatura uniforme e em equilíbrio com a temperatura do fluido refrigerante, e as medidas registradas pelos termopares estão coerentes.

A Tabela 6.1 resume os principais resultados experimentais para estado estacionário, após a partida do reator para a configuração 243.

Intervalo de									
tempo e	1250 a	2300 a	3200 a	4300 a	5900 a	6400 a	6950 a	7430 a	7850 a
Potência do	2000 s	2800 s	3800s	5000s	6200 s	6500s	7100s	7600 s	7920s
Reator	3,5	4,0	4,5	5,0	3,5	3,0	2,0	1,0	3,5
( <b>MW</b> )									
Termopar									
T1 (°C)	31,0	31,7	32,5	33,6	34,1	34,0	33,7	33,2	32,7
T2 (°C)	42,0	44,4	46,5	48,7	44,5	43,2	40,4	36,8	43,8
T3 (°C)	35,8	37,2	38,7	40,3	38,6	38,0	36,6	34,7	37,5
T4 (°C)	42,8	45,2	47,3	49,6	45,1	43,8	40,9	37,1	44,5
T5 (°C)	46,1	49,2	51,8	54,6	48,5	46,8	43,0	38,1	48,0
T6 (°C)	40,7	42,9	44,9	47,0	43,4	42,3	39,9	36,7	42,6
T7 (°C)	47.3	50,5	53.0	55,9	49.6	47,8	43,9	38.8	49,2
T8 (°C)	43,3	46,0	48,2	50,7	45,9	44,5	41,4	37,4	45,2
T10 (°C)	39.8	42,0	42,8	44,9	41,9	40,9	38.8	36,1	40,9
T12 (°C)	44.7	47.6	43,9	46,1	47.2	41.6	39.3	36.2	41.7
T14 (°C)	35,7	37,3	38,7	40,3	38,7	38,2	36,8	34,9	37,6

Tabela 6.1 Temperatura média para os diferentes níveis de potência - CONF 243

Na Tabela 6.1 pode-se observar que existe uma inconsistência nos valores de T12 registrados, pois para uma potência de 4,0 MW o valor registrado foi 47,6 °C e para as potências de 4,5 MW e 5,0 MW a temperatura foi de 43,9 °C e 46,1 °C, respectivamente, ou seja, para uma maior potência uma menor temperatura registrada. Provavelmente houve algum problema nas conexões deste termopar, uma vez que nos experimentos seguintes não foram observadas outras inconsistências.

Observa-se ainda que as temperaturas na placa lateral que faceia o elemento refletor (T2, T5 e T8) apresentam menores valores que as temperaturas da placa combustível que faceiam o EC-194 (T4, T7 e T12). Isto se deve a menor geração de calor na mesma, conforme Tabela 6.2, confirmando assim o bom funcionamento do ECI.

As Figura 6.3, Figura 6.4 e Figura 6.5 mostram as temperaturas de revestimento medidas nas posições 252,5 mm, 432,5 mm e 552,5 mm da entrada do canal, respectivamente, para os canais laterais e central, para uma potência de operação de 3,5 MW.

Observa-se que a temperatura no canal central é inferior às temperaturas dos canais laterais, ou seja, T3 é menor que T2 e T4 e T6 é menor que T5 e T7, assim como T10 é menor que T8 e T12.

A placa lateral com as temperaturas T4, T7 e T12 é mais quente, pois é a placa que está voltada para o elemento combustível 194 e, portanto, com maior geração de calor. Este comportamento se repete para todos os demais níveis de potência de operação do reator.



Figura 6.3 Temperaturas no revestimento na posição 252,5 mm da entrada do canal



*Figura 6.4 Temperaturas no revestimento na posição 432,5 mm da entrada do canal* 



Figura 6.5 Temperaturas no revestimento na posição 552,5 mm da entrada do canal

Na Figura 6.6 é mais fácil visualizar as diferenças de temperatura entre as placas laterais e a central.



Figura 6.6 Diferenças de temperatura entre as placas laterais e central

A Figura 6.7 é um detalhe da Figura 5.2, no intervalo de 7850 s a 8300 s, onde pode-se observar o comportamento das temperaturas de entrada e saída no ECI quando do desligamento do reator por baixa vazão.

A sequência do transiente provocado pela parada da bomba principal é a seguinte:

- A) Em 7918 s o reator é desligado por baixa vazão no núcleo, aproximadamente 93% da vazão nominal;
- B) Em 7962 s a vazão pelo núcleo vai a zero, abertura da válvula de circulação natural, e em seguida a temperatura de saída do fluido refrigerante T14 começa a subir;
- C) Em 8000 s a temperatura de entrada do fluido refrigerante T1 começa a subir e a temperatura de saída T14 começa a cair. Neste instante ocorre o início da inversão do escoamento, ou seja, o fluido escoa na direção ascendente em circulação natural;
- D) Após o início da circulação natural observam-se algumas flutuações pontuais na temperatura T1, causadas, provavelmente, por turbulências na região superior do núcleo devidas ao início do processo de circulação natural.



Figura 6.7 Temperaturas do fluido nos bocais de entrada e saída

# 6.1.2 Balanço de massa e energia

A Tabela 6.2 apresenta os dados da densidade de potência axial normalizada para o ECI.

<b>Comprimento Ativo</b>	Média das seis Placas	Média das seis Placas	Média das seis Placas			
( <b>mm</b> )	Laterais (Lado do EC	Centrais	Laterais (Lado do			
	194)		<b>Refletor</b> )			
20	0,293	0,262	0,281			
40	0,304	0,272	0,292			
60	0,343	0,307	0,329			
80	0,391	0,350	0,375			
100	0,445	0,398	0,427			
120	0,502	0,449	0,481			
140	0,563	0,504	0,540			
160	0,629	0,563	0,603			
180	0,699	0,625	0,670			
200	0,777	0,695	0,745			
220	0,871	0,779	0,835			
240	1,002	0,896	0,961			
260	1,141	1,020	1,094			
280	1,248	1,116	1,197			
300	1,33	1,189	1,275			
320	1,395	1,248	1,338			
340	1,443	1,291	1,384			
360	1,476	1,320	1,415			
380	1,493	1,335	1,432			
400	1,495	1,337	1,434			
420	1,48	1,324	1,419			
440	1,45	1,297	1,391			
460	1,405	1,257	1,347			
480	1,344	1,202	1,289			
500	1,271	1,137	1,219			
520	1,185	1,060	1,136			
540	1,091	0,976	1,046			
560	0,998	0,893	0,957			
580	0,928	0,830	0,890			
600	0,945	0,845	0,906			
Média das seis Placas	1,0	0,89	0,96			
Fator de Pico Radial						
(FPR)		(1,0+0,89+0,96)/3=0	0,95			

Tabela 6.2 Densidade de potência axial normalizada

Com a distribuição de potência apresentada da Tabela 6.2 podemos efetuar o cálculo teórico da potência dissipada no ECI para os vários níveis de operação.

O núcleo do reator é composto de 20 elementos combustíveis padrão, com 18 placas combustíveis cada, e 4 elementos combustíveis de controle, com 12 placas combustíveis cada. Assim, existem 408 placas combustíveis no núcleo. Para uma potência de 1,0 MW a potência média por placa combustível é 2,450 kW ou 44,12 kW por elemento combustível padrão.

A vazão média por elemento combustível, para a atual vazão da bomba principal, é 22,8 m<sup>3</sup>/h em 17 canais que deve remover o calor de 17 placas combustíveis, sendo 16 placas internas e 2 meias placas, uma em cada lateral.

Considerando que a vazão nos elementos combustíveis próximos a periferia do núcleo é 4% menor, conforme apresentado no Capítulo 3 deste trabalho, a vazão pelo elemento combustível a ser considerada é 0,96 x 22,8m<sup>3</sup>/h, ou seja, 21,89 m<sup>3</sup>/h. Portanto, o calor removido calculado para uma potência de reator de 1,0 MW é:

17 (placas) x FPR x 2,450 kW/placa = 39,98 kW.

Analogamente pode-se calcular a potência no ECI para as potências de 2,0 MW, 3,0 MW, 3,5 MW, 4,0 MW, 4,5 MW e 5,0 MW.

A Tabela 6.3 apresenta a comparação entre as potências calculadas e medidas durante o experimento.

Potência do Reator (MW)	3,50	4,00	4,50	5,00	3,50	3,00	2,00	1,00	3,50
Calor específico - C <sub>p</sub> (kJ/Kg °C)	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18
Potencia medida no ECI- 208 = vazão em massa <sup>(1)</sup> x c <sub>p</sub> x (TF14-TF1) (kW)	119,1	141,9	157,1	169,8	116,6	106,4	78,6	43,1	124,2
Potência calculada no ECI-208 (kW)	139,9	159,9	179,9	200	139,9	119,9	80,0	39,98	139,9
Diferença entre potência calculada e medida (DPMC) <sup>(2)</sup> (%)	17,5	12,7	14,5	15,2	17,8	12,7	1,8	-7,8	12,6

Tabela 6.3 Comparação entre a potência calculada e a potência medida

<sup>(1)</sup>vazão em massa =0,96 x (22,8 m<sup>3</sup>/h )/3600 s x 997 kg/m<sup>3</sup> = 6,062 Kg/s.

<sup>(2)</sup>DPMC = ((potência calculada no ECI-208)-(potência medida experimental))/(potência calculada ECI-208) \* 100%.

O balanço térmico, Tabela 6.3, apresenta erros de -7,8% a + 17,8%. Este fato comprova que o balanço térmico não é um bom parâmetro para se medir a potência de operação. Isto se deve às pequenas diferenças de temperatura entre a entrada e saída do elemento combustível associado à alta sensibilidade aos pequenos diferenciais de temperaturas desta metodologia. Para este fim específico o ideal seria um medidor diferencial de temperatura, de forma a eliminar a soma dos erros de calibração.

#### 6.1.3 Análise das temperaturas de revestimento

Nas análises apresentadas a seguir serão utilizados os programas PARET e MTRCR-IEAR1 já descritos no capítulo3 deste trabalho.

Embora o modelo MTRCR-IEAR1 já tenha sido plenamente validado em [5] contra resultados do código PARET, faz-se aqui apenas uma breve discussão para reforçar a validade do MTRCR-IEAR1 destas análises.

Para esta discussão foi escolhido, aleatoriamente, o último intervalo, 7850 a 7920 s, Figura 5.2, onde o reator operou a 3,5 MW.

A Tabela 6.4 apresenta os resultados experimentais de medida de temperatura para o revestimento e os valores calculados com o código PARET,  $T_{PARET}$ , e os valores calculados com o programa MTRCR-IEAR1,  $T_{MTRCR}$ , assim como as diferenças dos dois em relação aos dados experimentais.

Conforme mencionado na introdução deste trabalho, segundo a referência [13], os resultados obtidos com o DMPV-01, mostram que a vazão média pelo elemento combustível é 22,8 m<sup>3</sup>/h, que resulta em uma velocidade média de 1,92 m/s nos canais internos do elemento combustível. Considerando que a distribuição de vazão não é uniforme, ou seja, a vazão nos canais laterais apresenta um valor médio 12,5% menor e no canal central 8% maior, neste trabalho serão consideradas as seguintes vazões:

- 1) Canais Laterais com uma vazão de 1,174 m<sup>3</sup>/h
- 2) Canal Central com uma vazão de 1,448  $m^3/h$
- 3) Para o canal externo, a menos que se mencione o contrário, será admitida uma velocidade média igual a média da velocidade interna do EC, de forma a manter as mesmas condições médias de resfriamento dos canais internos.
Para esta análise será considerado apenas o canal central (revestimento T2, T6, T10 e fluido T11), pois a vazão pelos canais laterais é objeto de estudo neste trabalho e o código PARET não permite a análise de canais com diferentes vazões.

$T_{\text{EXPERIMENTAL}}(^{\circ}\text{C})$	T1=32,7	T3=37,5	T6=42,6	T10=40,9	T11=36,9
$T_{PARET}( \ ^{\circ}C)$	32,7	42,7	48,8	46,5	36,9
T <sub>PARET</sub> . T <sub>EXPERIMENTAL</sub> ( <sup>o</sup> C )	-	5,2	6,2	6,5	0
$T_{MTRCR}( ^{o}C )$	32,7	42,6	48,6	46,2	36,8
$T_{MTRCR}$ - $T_{EXPERIMENTAL}$ (°C)	-	4,9	6,0	6,1	0,1
$T_{PARET} T_{MTRCR} ( \ ^{\circ}C )$	-	0,3	0,2	0,4	0,1

Tabela 6.4 Comparação PARET e MTRCR-IEAR1 com os valores experimentais

A temperatura do revestimento calculada com o modelo MTRCR-IEAR1 e o código PARET apresentam um erro em relação aos dados experimentais, mas a diferença entre eles é praticamente nula. Por este motivo e pelo fato de o MTRCR-IEAR1 permitir a análise de canais com diferentes vazões em canais paralelos, as demais análises apresentadas neste trabalho serão realizadas com o mesmo.

Estas diferenças dos cálculos se repetem para outros intervalos de tempo ou outras potências e podem ser justificadas por dois motivos:

A primeira é que este experimento foi realizado numa segunda-feira e houve operação do reator até a sexta-feira anterior, com isso o calor de decaimento formou um colchão de água mais quente na parte superior da piscina. Isto pode ser comprovado através Figura 6.8 que mostra em detalhe o comportamento da temperatura T1 na entrada do ECI durante a realização dos experimentos. Pode-se observar que a temperatura não é constante e aumenta mais de 5 °C num período de aproximadamente 2 horas.



Figura 6.8 Temperatura de entrada no ECI

Outra importante justificativa é que a potência foi estabilizada por poucos minutos em cada um dos níveis de potência. Portanto, não se pode afirmar que não houve flutuações, ainda que pequenas, em cada nível.

Para dar continuidade ao desenvolvimento do trabalho e desenvolver algumas análises serão utilizados os dados de operação a 3,5 MW, na configuração 243, do início da semana anterior. Este intervalo de tempo foi escolhido em função da estabilidade das temperaturas.

A Figura 6.9 mostra que para a data e horário escolhidos, as temperaturas são bem estáveis.



Figura 6.9 Comportamento das temperaturas no ECI com o reator operando 3,5 MW-Conf-243

A Tabela 6.5 mostra a temperatura média registrada e o desvio padrão para as temperaturas registradas pelos termopares de 1 a 14 para o intervalo considerado.

	T1	T2	Т3	Τ4	T5	Т6	T7	Т8	Т9	T10	T11	T12	T13	T14
$T(^{o}C)$														
	33,7	44,5	38,6	45,6	47,3	42,6	48,6	44,7	41,4	41,8	39,5	46,1	41,6	38,2
Desvio														
padrão	0,05	0,09	0,09	0,12	0,10	0,08	0,15	0,08	0,18	0,17	0,08	0,12	0,11	0,08

Tabela 6.5 Temperatura média registrada no intervalo e desvio padrão

A condição de regime permanente é fundamental para avaliação da condutância térmica entre a superfície do revestimento e a superfície da pastilha.

A Figura 6.10 mostra esquematicamente a pastilha em contato com uma placa combustível.



Figura 6.10 Contato entre o revestimento e a pastilha

Desta forma, tem-se as seguintes equações :

No revestimento

$$Q = Kr x Ap x (T_{ICR} - T_{SR}) / e_r$$
(1)

Kr é a condutividade térmica do revestimento (conhecida)

T<sub>ICR</sub> é calculada pelo MTRCR-IEAR1

Ap Área transversal da pastilha

er espessura do revestimento

Na interface revestimento pastilha

$$Q = h_c x Ap x (T_{SR} - T_{SP})$$
<sup>(2)</sup>

h<sub>c</sub> é a condutância térmica de contato ( a ser determinada)

<u>Na pastilha</u>

$$Q = Kp x Ap x (T_{SP} - T_P) / (e_P/2)$$
(3)

Kp é a condutividade térmica da pastilha (mesmo material do revestimento)

As equações 1, 2 e 3 foram implementadas no MTRCR-IEAR1 para o cálculo da condutância térmica de contato.

A Tabela 6.6 apresenta os valores de condutância térmica calculada para as configurações 243, 245 e 246. Os valores apresentados referem-se apenas ao canal central. O cálculo para os canais laterais seria inviável sem conhecer a vazão nos canais vizinhos (externos), uma vez que é necessário conhecer os diferenciais de temperatura. Isso não ocorre nos canais centrais (fechados) que estão entre canais fechados.

. .

Termopar	Configuração								
	243	24	45	246					
	SC	SC	CC	SC	CC				
Τ2	25561	24040	25506	24891	28271				
<b>T6</b>	28731	31858	32539	34652	40454				
<b>T10</b>	25659	29121	30423	37125	46118				
Média	26659	28340	29489	32213	38281				
Média	26659	28340	29489	32213	382				

O valor de condutância térmica média calculada para a configuração 243 foi de 26659 W/m<sup>2</sup> K, para a configuração 245 foi 28915 W/m<sup>2</sup> K e para a configuração 246, 35247 W/m<sup>2</sup> K. Para uma condição de projeto ou análise de segurança, deveria ser adotado o menor valor encontrado, pois é o que resulta no maior valor de temperatura para o combustível. Nesta análise, é adotado um valor médio 30274 W/m<sup>2</sup>K, uma vez que o objetivo é de destacar a importância do conhecimento da distribuição de vazão no núcleo de um reator de pesquisas.

### 6.1.3 Análise das temperaturas de revestimento

Inicialmente será analisado o canal central. A Figura 6.11 é uma representação esquemática do canal, mostrando a posição relativa dos termopares.

242 245 246



Figura 6.11 Representação de um canal central

As temperaturas calculadas para os termopares T3, T6 e T10 médias das temperaturas das superfícies da pastilha em contato com as duas placas laterais.

A Figura 6.12 apresenta os resultados obtidos, onde se pode observar boa concordância entre as temperaturas calculadas e os valores registrados pelos termopares. Os valores de T3, T6 e T10 aparecem na ordem crescente do comprimento ativo.

Um ponto importante a destacar é que a temperatura registrada pelo termopar (T6), na posição de máxima temperatura, é 6,5 °C inferior à temperatura calculada para a superfície das placas combustíveis. Esta diferença é justificada pela resistência de contato entre a superfície das pastilhas e a superfície das placas combustíveis.



Figura 6.12 Comparação das temperaturas dos termopares com as calculadas

A seguir é apresentada a análise realizada para a placa lateral Figura 6.13 que faceia um elemento refletor.



Figura 6.13 Representação do canal lateral

Para o canal central serão apresentados os resultados para o centro das pastilhas (comparação com as medidas dos termopares T3, T6 e T10) e também para a superfície das placas que estão em contato com a pastilha Tface1 e Tface2 e para a superfície externa da placa lateral.

A vazão no canal lateral interno é 1,174 m<sup>3</sup>/h e para o canal entre o EC e o refletor 1,448 m<sup>3</sup>/h, proporcional à área de escoamento de forma a manter a mesma velocidade para os canais.

A Figura 6.14 apresenta a comparação de temperaturas registradas pelos termopares e as calculadas e as temperaturas na superfície das placas combustíveis que faceiam as pastilhas dos termopares.



Figura 6.14 Comparação das temperaturas dos termopares com as calculadas

A temperatura calculada para o termopar T2 é 3 °C menor que a temperatura registrada pelo termopar T2. Para reduzir a diferença entre a temperatura de T2 calculada com a temperatura registrada, seria necessário ajustar a vazão no canal externo em aproximadamente 75%, ou seja, apenas 25% da vazão do canal interno. A Figura 6.15 apresenta os resultados desta análise.



Figura 6.15 Comportamento das temperaturas no canal com redução de 75% da vazão no canal externo.

Ao reduzir-se a vazão do canal externo conseguiu-se aproximar os valores de T2 calculado e medido, no entanto, a diferença de temperaturas entre os valores medidos e calculados para T6 e T10 aumentou. Para reduzir esta diferença seria necessário aumentar a vazão no canal externo, mas os valores de T2, calculado e medido, voltariam a divergir. Portanto, conclui-se que para convergir todos os valores de temperatura calculados e medidos seria necessário que a vazão aumentasse ao longo do canal. Isto é impossível para canais fechados, mas como se trata de um canal aberto é muito provável que a vazão aumente ao longo do mesmo, pois além do escoamento descendente, tem-se também um escoamento lateral, causando aumento da vazão ao longo do canal.

Observa-se também que ao reduzir a vazão externa, as temperaturas da placa lateral e a temperatura da face externa aumentam de 54 °C para 65 °C e da face 1 aumenta de 54 °C para 63 °C, enquanto que a temperatura da placa interna  $T_{face2}$  praticamente não se altera, ficando em 54 °C.

A Figura 6.16 representa o outro canal lateral que faceia o elemento combustível EC194.



Figura 6.16 Representação do canal lateral

Esta análise foi realizada para as mesmas condições de resfriamento utilizadas na análise do outro canal lateral.

A Figura 6.17 apresenta os resultados da análise para este canal, onde se pode observar um comportamento de temperaturas muito semelhante ao dos resultados do canal analisado anteriormente. Neste caso a diferença entre a temperatura calculada e a registrada pelos termopares T7 e T12 é menor e para o T4 é maior.



Figura 6.17 Comparação das temperaturas dos termopares com as calculadas

Para que a temperatura calculada para o termopar T4 atinja a temperatura registrada pelo termopar T4 a redução de vazão neste caso tem que ser ainda maior, 90 %.



A Figura 6.18 mostra o resultado desta análise considerando apenas 10 % de vazão no canal externo.

Figura 6.18 Comportamento das temperaturas no canal com redução de 75% da vazão no canal externo

Neste canal pode-se concluir que a vazão é praticamente uniforme, pois a temperatura calculada para todos os termopares praticamente coincidiu com o valor medido, existe apenas uma pequena diferença nos valores para o termopar T12.

No entanto, esta redução de vazão implica que as temperaturas da face externa aumentem 17 °C e temperatura da face 1 aumente 14°C.

#### 6.2 Análise e discussão dos resultados para os experimentos na configuração 245

#### **6.2.1** Considerações iniciais

A Figura 6.19 apresenta um detalhe da Figura 5.6, onde se pode observar que todas as temperaturas se estabilizam em torno de 27,33 °C, que corresponde à temperatura da água na piscina do reator e, portanto, podemos garantir que os termopares continuam respondendo bem.



Figura 6.19 Respostas dos termopares com o reator desligado e a bomba em operação

A Tabela 6.7 resume os principais resultados experimentais para a configuração 245 sem a caixa de alumínio ao redor do núcleo e também com a caixa para uma potência de operação de 4 MW.

								<u> </u>	3				
Termopar	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
					Ten	nperatura	ι [⁰C]						
com caixa	40,7	33,6	41,6	48,7	39,8	45,6	43,4	35,8	38,5	33,5	41,8	34,8	32,3
Desvio													
padrão	0.04			0.40		0.45	0.44	0.00	0.44	0.51		0.40	
	0,26	0,28	0,27	0,48	0,34	0,17	0,41	0,30	0,64	0,61	0,27	0,40	0,31
sem caixa	42,3	36,5	42,6	50,0	42,6	48,2	45,4	38,5	41,4	36,6	44,5	37,6	35,3
Desvio													
padrão	0,24	0,29	0,26	0,35	0,31	0,15	0,37	0,31	0,61	0,67	0,27	0,33	0,29

Tabela 6.7 Principais resultados experimentais para a configuração 245

A temperatura média de entrada do fluido refrigerante é 29,8 °C e 27,3 °C sem caixa e com caixa ao redor do núcleo, respectivamente.

A temperatura média de saída do fluido refrigerante é 35,3 °C e 32,3 °C sem caixa e com caixa ao redor do núcleo, respectivamente.

## 6.2.2 Balanço de massa e energia

A Tabela 6.8 apresenta os dados da densidade de potência axial normalizada para o elemento combustível instrumentado.

Comprimento	Media das o p	lacas	
Ativo (mm)	laterais (lado	EC Média das 6	placas Média das 6 placas laterais
	209)	centrais	(lado EC 197)
20	0 3665	0 306	0 307
40	0,3788	0,300	0.318
60	0,4255	0,317	0.357
80	0,4255	0,356	0,407
100	0,4838	0,400	0,467
120	0,5509	0,40	0,402
140	0,0223	0,52	0,522
160	0,0973	0,585	0,585
180	0,7772	0,03	0,052
200	0,8033	0,721	0,724
220	0,958	0,801	0,803
240	1,0724	0,896	0,899
260	1,2322	1,03	1,033
280	1,4044	1,174	1,178
300	1,5335	1,282	1,286
320	1,6344	1,366	1,37
340	1,7118	1,431	1,435
360	1,7709	1,48	1,485
300	1,8102	1,513	1,518
380	1,8311	1,53	1,535
400	1,8323	1,531	1,536
420	1,8139	1,516	1,521
440	1,777	1,485	1,49
460	1,7217	1,439	1,444
480	1,6479	1,377	1,382
500	1,5581	1,302	1,306
520	1,4536	1,215	1,219
540	1,3392	1,119	1,123
560	1,2261	1,025	1,028
580	1,1437	0,956	0,959
600	1,1757	0,982	0,986
Média das	seis		
Placas			
	1,227	1,026	1,029
Média	do	· · ·	<u> </u>
combustível F	ator	FPR=(1.112+1.08)	6+1.113)/3=1.094
de Pico Ra	adial		- , -,,
(FPR)			

 Tabela 6.8 Densidade de potência axial normalizada

 Comprimento
 Média das 6 plaças

Considerando o Fator de Pico Radial FPR=1,094 e seguindo o mesmo procedimento apresentado no item 6.1.2 determina-se uma potência de 166,6 kW para o elemento combustível.

O balanço térmico indica que para o experimento sem a caixa ao redor do núcleo está sendo removida uma potência de 139 kW e o experimental com a caixa indica que está sendo removida uma potência de 151,7 kW, representando assim um erro de - 9,8% para o experimento sem a caixa e de -19,8 % para o experimento com a caixa. Desta forma, confirma-se mais uma vez que o balanço térmico não é uma boa técnica para se calcular a potência de operação.

A Figura 6.20 mostra que a instalação da caixa ao redor do núcleo diminui a diferença de temperaturas entre a placa central e as laterais, indicando uma melhoria nas condições de resfriamento das placas laterais



Os sobrescritos nas temperaturas indicam "sc" sem caixa e "cc" com caixa.

Figura 6.20 Temperaturas ao longo do canal com e sem a caixa ao redor do núcleo

Outro aspecto importante a se observar é que a instalação da caixa não altera as temperaturas das placas durante o transiente de parada de bomba. A Figura 6.21 mostra, por exemplo, o comportamento da temperatura T3 durante este transiente. A temperatura T3sc é a temperatura do termopar T3 sem a caixa, T3cc é a temperatura do termopar T3 com a caixa. A temperatura da água na entrada do EC para o transiente sem caixa foi de

29,8 °C para o transiente com caixa 27,3 °C, ou seja 2,5 °C. Portanto, a diferença de temperatura da parede deve ser também de aproximadamente 2,5 °C. A Figura 6.21 também mostra a comparação com a temperatura T3 corrigida de 2,5 °C e verifica-se que praticamente não existe diferença entre uma curva e outra. O mesmo comportamento foi constatado para todos os outros termopares.



Figura 6.21 Temperaturas do núcleo no transiente de parada de bomba

A Figura 6.22 mostra o comportamento da temperatura dos demais termopares sem a caixa ao redor do núcleo e a Figura 6.23 com a caixa, respectivamente.



Figura 6.22 Comportamento da temperatura dos termopares sem a caixa



Figura 6.23 Comportamento da temperatura dos termopares com a caixa

#### 6.2.3 Análise das temperaturas de revestimento

# 6.2.3.1 Análise das temperaturas de revestimento para o experimento sem a caixa

Inicialmente será analisado o canal central e a Figura 6.24 é uma representação esquemática do canal, mostrando a posição relativa dos termopares no canal.



Figura 6. 24 Representação esquemática de um canal central

A Figura 6.25 mostra a análise do canal central sem a caixa ao redor do núcleo. Observa-se uma diferença de temperatura, calculada, para T3, T6 e T10 de aproximadamente 3,5 °C, 1,9 °C e 1 °C, respectivamente.



Figura 6.25 Comparação dos valores medidos e calculados sem a caixa

A Figura 6.26 mostra a análise do canal central com a caixa ao redor do núcleo, onde se observa que as temperaturas calculadas são praticamente iguais às medidas pelos termopares, sendo a diferença para o T3 menor que 1°C.



Figura 6.26 Comparação dos valores medidos e calculados com a caixa

No experimento realizado com a caixa a temperatura de entrada foi de 27,3 °C e no experimento sem a caixa a temperatura foi de 29,8 °C, no entanto, as temperaturas registradas pelos termopares no experimento sem caixa foi menor, Tabela 6.9.

rabela 0.9 Registro dos termopares para o canar centrar									
	Temperatura de	Termopar T2	Termopar T6	Termopar T10					
	entrada (°C)	(°C)	(°C)	(°C)					
Sem caixa	29,8	41,1	40,5	39,1					
Com caixa	27,3	42,3	42,7	41,5					
Diferença	2,5	-1,2	-2,2	-2,4					

Tabela 6.9 Registro dos termopares para o canal central

A instalação da caixa ao redor do núcleo pode ter aumentado a vazão interna nos elementos combustíveis, mas esta diferença é muito pequena, dado que foi utilizada uma condutância média para todos os termopares.

A seguir passa-se a análise do canal que faceia o elemento combustível EC 209, Figura 6.27.



Figura 6.27 Representação do canal lateral

A Figura 6.28 apresenta os resultados deste canal lateral sem a caixa ao redor do núcleo e com condições equivalentes de resfriamento, mesma velocidade de escoamento, para os canais interno e externo.

Observa-se que as temperaturas calculadas ao longo do canal são menores que as medidas (T4 e T7) só se igualando no final do canal (T12). Esta inconsistência indica uma não uniformidade no escoamento.



Figura 6.28 Comparação da temperatura dos termopares com as calculadas

A Figura 6.29 apresenta a simulação de uma redução de 80% na vazão no canal lateral. Nesta condição as temperaturas ao longo do canal (T4 e T7) praticamente se igualam, só divergindo no final do canal quando a temperatura calculada (T12) fica maior que o valor medido. Isto confirma que não há uma vazão uniforme e constante, que satisfaça as condições de resfriamento registrada pelos termopares.



Figura 6.29 Temperaturas após redução de 80% da vazão no canal externo

A seguir apresenta-se a análise do mesmo canal após a instalação da caixa ao redor do núcleo.

A Figura 6.30 mostra a análise deste canal considerando condições equivalentes de resfriamento para os canais interno e externo.

Pode-se dizer que neste caso os resultados das temperaturas calculadas com os valores registrados são bem mais satisfatórios, aproximando os valores de T4 e T7 calculados com os medidos e T12 medido abaixo do valor calculado, indicando que houve um aumento de vazão e uma maior uniformização do escoamento no canal externo.



Figura 6.30 Comparação da temperatura dos termopares com as calculadas após a instalação da caixa

A seguir, passa-se a análise do canal que faceia o elemento combustível EC 197. Inicialmente é apresentada a análise sem a instalação da caixa.



Figura 6.31 Representação do canal lateral

A Figura 6.32 mostra a análise deste canal considerando condições equivalentes de resfriamento para os canais interno e externo. Pode-se dizer que a vazão na entrada do canal até um pouco mais do meio deve ser maior para reduzir as diferenças entre os valores calculados e medidos. Na saída do canal presume-se que a vazão aumenta, minimizando as diferenças, indicando não uniformidade de vazão no canal.



Figura 6. 32 Comparação da temperatura dos termopares com as calculadas antes da instalação da caixa

Na análise apresentada a seguir reduz-se a vazão no canal externo em 70%, Figura 6.33. Observa-se que em boa parte do canal esta redução de vazão permitiu aproximar bem os valores calculados e medidos, no entanto no final do canal voltaram a divergir, confirmando uma não uniformidade no escoamento.



Figura 6.33 Temperaturas antes da instalação da caixa e redução de 70% na vazão

A Figura 6.34 mostra a análise do mesmo canal após a instalação da caixa indicando uma redução das temperaturas no início até o meio do canal, ou seja, as temperaturas calculadas e medidas convergem, indicando aumento e uniformização do escoamento ao longo do canal.



Figura 6.34 Temperaturas após a instalação da caixa

### 6.3 Análise e discussão dos resultados para os experimentos na configuração 246

### 6.3.1 Considerações iniciais

A Figura 6.35 apresenta um detalhe da Figura 5.11, onde se pode observar que todas as temperaturas se estabilizam em torno de 17,9 °C, que corresponde à temperatura da água na piscina do reator naquele momento e, portanto, podemos garantir que os termopares continuam respondendo bem.



Figura 6.35 Temperatura com o reator desligado e a bomba em operação

A Tabela 6.10 resume os principais resultados experimentais para a configuração 246 sem a caixa de alumínio ao redor do núcleo e também com a caixa para uma potência de operação de 4 MW.

		I · · · · ·											
Termopar	T2	Т3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
					Tem	peratur	a [⁰C]						
com caixa	34,2	28,4	33,6	45,2	36,1	41,8	40,2	31,0	34,8	28,9	38,5	29,6	27,8
Desvio													
padrão	0,21	0,28	0,06	0,07	0,21	0,28	0,21	0,35	0,34	0,21	0,21	0,21	0,21
sem caixa	37,1	29,8	36,8	48,2	37,2	43,3	42,7	33,1	36,1	30,4	40,0	31,5	29,4
Desvio													
padrão	0,55	0,55	0,07	0,13	0,35	0,48	0,28	0,00	0,52	0,62	0,14	0,35	0,42

Tabela 6.10 Temperatura média registrada no intevalo 2500-2600 s

A temperatura média de entrada do fluido refrigerante é 18,3 °C e 20,9 °C e a temperatura média de saída do fluido refrigerante é 29,4 °C e 27,8 °C com caixa e sem caixa ao redor do núcleo, respectivamente.

# 6.3.2 Balanço de massa e energia

A Tabela 6.11 apresenta os dados da densidade de potência axial normalizada para o elemento combustível instrumentado.

Comprimento Ativo (mm)	Média das 6 placas	Média das 6 placas	Média das 6 placas laterais
	laterais (lado EC 209)	centrais	(lado EC 197)
20	0,325	0,324	0,336
40	0,334	0,329	0,341
60	0,378	0,371	0,384
80	0,436	0,427	0,442
100	0,501	0,491	0,507
120	0,572	0,560	0,579
140	0,649	0,636	0,656
160	0,733	0,717	0,740
180	0,824	0,806	0,831
200	0,923	0,902	0,928
220	1,031	1,005	1,032
240	1,146	1,115	1,139
260	1,255	1,220	1,245
280	1,355	1,317	1,343
300	1,442	1,401	1,431
320	1,515	1,473	1,505
340	1,572	1,530	1,564
360	1,613	1,570	1,606
380	1,637	1,595	1,632
400	1,644	1,602	1,640
420	1,632	1,592	1,630
440	1,603	1,564	1,602
460	1,557	1,519	1,557
480	1,494	1,458	1,495
500	1,415	1,381	1,417
520	1,322	1,291	1,324
540	1,219	1,191	1,222
560	1,117	1,092	1,121
580	1,044	1,023	1,049
600	1,085	1,074	1,100
Média das seis Placas	1,112	1,086	1,113
Média do combustível			
Fator de Pico Radial		FPR=(1,112+1,086+1,113)/	3=1,103
(FPR)			

Tabela 6.11 Distribuição de potência axial normalizada

Considerando o Fator de Pico Radial FPR=1,103 e seguindo o mesmo procedimento apresentado no item 6.1.2 determina-se uma potência de 183,8 kW para o elemento combustível.

O experimento com a caixa e sem caixa indica que está sendo removida uma potência de 240 kW e 215 kW, representando assim um erro de 30,5 % e 16,0 %, respectivamente, confirmando mais uma vez que o balanço térmico não é uma boa técnica para se calcular a potência de operação.

A Figura 6.36 mostra que a instalação da caixa ao redor do núcleo diminui a diferença de temperaturas entre a placa central e as laterais, indicando uma melhoria nas condições de resfriamento das placas laterais



Os sobrescritos nas temperaturas indicam "sc" sem caixa e "cc" com caixa.

Figura 6.36 Temperaturas ao longo do canal com e sem a caixa ao redor do núcleo

A Figura 6.37 apresenta o comportamento da temperatura do termopar T3 durante um transiente de parada de bomba, e como constatado no experimento da configuração 245, a instalação da caixa ao redor do núcleo não causa nenhum aumento ou redução de temperatura nas placas combustíveis.



Figura 6.37 Temperatura durante transiente de parada de bomba

# 6.3.3 Análise das temperaturas de revestimento

Apresenta-se a seguir a análise do canal central com e sem a caixa instalada ao redor do núcleo. A Figura 6.38 é uma representação esquemática do canal, mostrando a posição relativa dos termopares no canal.



Figura 6.38 Representação esquemática do canal central

A Figura 6.39 e Figura 6.40 apresentam os resultados com e sem a caixa ao redor do núcleo, respectivamente.

Ao contrário dos resultados para o canal central na configuração 245, que aparentemente apresentou um pequeno aumento de vazão após a instalação da caixa, neste caso as temperaturas registradas pelos termopares foram ligeiramente menor, o que poderia ser um indicativo de aumento de vazão. Neste caso, a diferença nas temperaturas ficou entre 1,0 °C e 1,4 °C. Portanto, não é possível concluir que haja alteração de vazão no canal central.



Figura 6.39 Temperaturas após a instalação da caixa ao redor do núcleo



Figura 6.40 Temperaturas após a retirada da caixa ao redor do núcleo

A próxima análise é do canal lateral que faceia o elemento combustível EC 197. A Figura 6.41 é uma representação esquemática deste canal.



Figura 6.41 Representação esquemática do canal

A Figura 6.42 mostra os resultados para a análise deste canal, considerando condições equivalentes de resfriamento para o canal interno e externo, sem a caixa ao redor do núcleo.

Observa-se que os valores calculados encontram-se abaixo daqueles registrados ao longo de todo o canal, indicando uma menor vazão e também praticamente uniforme.



Figura 6.42 Temperaturas após a instalação da caixa ao redor do núcleo

A Figura 6.43 mostra os resultados para o mesmo canal, porém com uma vazão 30 % menor no canal externo. Com esta redução as temperaturas calculadas e medidas convergiram ao longo de todo o canal indicando uma vazão de resfriamento uniforme.



Figura 6.43 Temperaturas com a caixa e redução de 30% na vazão do canal externo

A Figura 6.44 mostra a análise do mesmo canal após a retirada da caixa. Neste caso não existe muita divergência dos valores na entrada do canal. À medida que se aproxima

do meio do canal as diferenças aumentam e voltam a diminuir próximo a saída, indicando uma numa não uniformidade de escoamento ao longo deste canal.



Figura 6.44 Comparação da temperatura dos termopares com as calculadas sem a caixa

A próxima análise é do canal lateral que faceia o elemento combustível EC 209. A Figura 6.45.é uma representação esquemática deste canal.



Figura 6.45 representação esquemática do canal

A Figura 6.46 mostra a comparação da temperatura dos termopares com as calculadas com a caixa ao redor do núcleo. A análise deste canal mostra que com a instalação da caixa, as temperaturas calculadas e medidas convergem ao longo de todo o canal e que a vazão também é uniforme ao longo do canal.



Figura 6.46 Temperaturas após instalação da caixa ao redor do núcleo

A Figura 6.47 mostra que a retirada da caixa não causou grande impacto nas temperaturas, porém houve um ligeiro aumento da diferença de temperatura entre os valores dos termopares e as placas combustíveis, o que representa uma redução de vazão no canal externo.



Figura 6.47 Comparação da temperatura dos termopares com as calculadas sem a caixa

#### 6.4 Análise de um canal quente hipotético

A Figura 6.33 apresenta o resultado das temperaturas da placa lateral do ECI voltada para o EC 197, com uma redução de 70% na vazão do canal externo. A máxima temperatura na superfície externa da placa lateral atinge o valor de 68,3 <sup>0</sup>C.

A seguir apresenta-se a análise da mesma placa considerando as mesmas condições de resfriamento, porém considerando a hipótese de que o ECI estivesse no canal quente do núcleo do reator com um valor típico de fator de pico radial, FPR=1,5, operando na potência de 5,0 MW e sem caixa ao redor do núcleo.



Figura 6.48 Temperaturas calculadas para um canal quente

Nesta situação a temperatura da superfície externa atingiria o valor de 96 °C, ultrapassando o limite operacional de 95 °C, Tabela 4.1. A temperatura calculada para os termopares é praticamente a temperatura da superfície da primeira placa interna,  $T_{face2}$ .

Os resultados desta análise podem justificar os problemas de oxidação mais acentuada observados em alguns elementos combustíveis, após o aumento de potência para 5 MW.
## 7 CONCLUSÃO

O objetivo da pesquisa foi plenamente alcançado com o desenvolvimento, experimentação do ECI.

Os ensaios com o Elemento Combustível Instrumentado atenderam as expectativas iniciais, comprovando as reais deficiências de resfriamento do núcleo, no que diz respeito aos canais laterais.

A colocação da caixa ao redor do núcleo, de fato, melhora as condições de resfriamento das placas laterais dos elementos combustíveis, reduzindo a diferença de temperatura entre as placas centrais e laterais. Além disso, reduz o escoamento transverso ao longo dos canais externos para a maioria dos elementos combustíveis. Concluiu-se também que não há interferência nos transientes de parada de bomba e circulação natural, ou seja, não há prejuízos nos aspectos de segurança para estes transientes.

O ECI pode ser utilizado para treinamento e ensino, demonstrando o comportamento de um elemento combustível durante a partida, parada e transiente de parada de bombas.

Os resultados dessa pesquisa comprovam que a redução da densidade de urânio nas placas laterais, até a troca do trocador de calor e o aumento de vazão, foi acertada, minimizando a oxidação acentuada das placas laterais.

Este projeto representa um importante marco no estudo termo-hidráulico do Reator IEA-R1, dada a tamanha quantidade de informações obtidas e sua utilidade no projeto, melhoria e capacitação na construção, montagem e fabricação de elementos combustíveis instrumentados.

As soluções propostas nessa pesquisa podem ser amplamente utilizadas para outros reatores de pesquisa.

As análises de canais com diferentes condições de resfriamento apresentam resultados mais realistas.

Este trabalho reforça o fato de que para análise termo-hidráulica, independente do código utilizado, é fundamental o conhecimento das reais condições de operação, sob pena de se obter resultados não adequados para a representação dos fenômenos envolvidos.

## REFERÊNCIAS

## [1] INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. *"Relatório de Análise de Segurança do Reator IEA-R1m"*. IPEN – CNEN/SP, Diretoria de Reatores, São Paulo, set. 1996.

[2] Adimir dos Santos, José A. Perrotta, José Luis F. Bastos, Mitsuo Yamaguchi, Paulo E.
 O. Lainetti, Pedro E. Umbehaun. *"Core calculations for the upgrading of the IEA-R1 research reactor"* 21<sup>st</sup> International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR) Sao Paulo, Brazil - 18-23 October 1998.

 [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. "Safety Assessment of Research Reactors and Preparation of the Safety Analysis Report". Viena, 1994.
 (IAEA – Safety Series N<sup>0</sup> 35-G1).

[4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. "Research Reactor Core Conversion From the Use of Highly Enriched Uranium to the Use of Low Enriched Uranium Fuels Guidebook" Viena, Aug. 1980. (IAEA – TECDOC - 233).

[5] Umbehaun, P. E., "Metodologia para Análise Termo-Hidráulica de Reatores de Pesquisa Tipo Piscina com Combustível Tipo Placa", 2000, Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

[6] Silva, J. E.R et al " Inspeção Visual dos Elementos Combustíveis e Barras de Controle do Núcleo do Reator IEAR1". IPEN-CNEN/SP, São Paulo, Mar. 2015 (CEN-PSE-IEAR1-127-00 RELT-001-00).

[7] Klein, S.A. and Alvarado, F.L. "*Engineering Equation Solver (EES) Version* 4.334W" Dec. 1996.

[8] Woodruf, W. L. "COBRA-3C/RERTR - A Thermal-hidraulic Subchannel Code with Low Pressure Capabilities and Suppliment" Argonne National Laboratory, 1983.

[9] Obechain, C. F. "PARET - A Program for the Analysis of Reactor Transients" IDO 17282, Idaho National Engineering Laboratory, 1969.

[10] Castro, A.J.A., Umbehaun, P.E., Bastos, J.L.F. "Determinação dos Coeficientes de Perda da Carga do Reator IEA-R1". 11<sup>th</sup> Meeting on Reactor Physics and Termal-Hydraulics. Poços de Caldas – Brasil, Aug. 18 –22, 1997.

[11] Castro, A.J.A. e Almeida, J.C. "Experimento de Perda de Carga nos Elementos Combustíveis e de Controle do IEA-R1". IPEN-CNEN/SP, São Paulo, Ago. 1996 (Relatório Interno PSI.RAT.IPEN-R00, RELT.001.R00).

[12] Castro, A.J.A., Almeida, J.C. e Umbehaun, P.E. "Experimento de Perda de Carga nos Elementos de Irradiação de Amostras Refrigerados a Água e Irradiador de Silício".
IPEN-CNEN/SP, São Paulo, Set 1997. (Relatório Interno PSI.ROI.IEA-R1.026, RELT.002.R00).

[13] Umbehaun, P. E., Mendonça, A. G., "Análise Termo-hidráulica do Elemento de Irradiação de Silício (EIS) de 5 Polegadas" - IPEN/CENEN-SP, São Paulo, Set. 1997
(Documento PSI.ROI.IEA-R1.026 nº RELT.001.R00).

[14] Torres, W. M., Umbehaun P. E., Andrade, D. A. and Souza, J. A. B. – "A MTR fuel element flow distribution measurement preliminary results" - The 25th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR), Chicago, Illinois on October 5-10, 2003.

[15] Schreiner, P. and Krull, W." *The New Compact Core Design of the FRG-1* ". IAEA-International Symposium on Research Reactor "– Utilization, Safety and Management, Lisbon – Portugal 6-10 Sept.1999.

[16] Chavez, J.C.; Barrera, M; Jimenez, O.; Lisboa, J.; Marin, J.; "*LEU Fuel Fabrication Program for the RECH-1 Reactor*", International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Las Vegas, Oct 1-6, 2000.

[17] Umbehaun, P. E., Torres, W. E., Andrade, D. A.; "Análise termo-hidráulica das placas externas de um elemento combustível tipo placa utilizado no reator de pesquisas IEA-R1", ENCIT 2004, ABCM, Rio de Janeiro, Dec 03, 2004.

[18] Rios, I.A., Andrade D. A., Domingos D. B. and Umbehaun, P. E., "*Uranium density reduction on fuel element side plates assessment*". International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011 Belo Horizonte, MG, Brazil, October 24-28, 2011.

[19] Umbehaun, P.E. ; Yamaguchi, M. "Análise Neutrônica e Termo-hidráulica da redução de urânio nas placas laterais do elemento combustível do IEA-R1". IPEN-CNEN/SP, São Paulo, Set. 2001. (Relatório Interno PSE.CENF.IEAR1.036.00 - RELT.001.00).

[20] Kreyger, P.J., Essler, W.A. and Dellmann, W. "*In-core heat transfer in MTR plate type fuel elements*" NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN 12 (1970) 231-248. NORTH-HOLLAND PUBLISHING COMPANY.

[21] Sedvik B., Yavuz H.," *Experimental Measurements for Plate Temperatures of MTR Fuel Elements Cooled in Stagnant Air and Comparison with Computed Results*", Kerntechnik 63, 5-6, 1998.

[22] Sevdik B., Türker T., Taylan S., Uzonur O., "*Experimental Measurements for Plate Temperatures of MTR Fuel Elements at Sudden Loss-of Flow Accident and Comparison with Computed Results*" www-pub.iaea.org/...2007.../B.%20Sevdik.pdf.

[23] Day, S. E., "*The Use of Experimental Data In a MTR-Type Nuclear Reactor Safety Analysis*". Thesis (doctor) - McMaster University, 2006.

[24] Boulcourt, P., Sacristan P., Martin M., Naury S., Gallo-Lepage D., Chaussy, J.M., Loubiere, S., Chabre, A., Lemoine, P. "*Instrumented fuel plate for IRIS irradiation program in the OSIRIS reactor*" JOINT MEETING of the National Organization of Test, Research, and Training Reactors and the International Group on Research Reactors September 12-16, 2005 at the Holiday Inn, Gaithersburg, MD Sponsored by the National Institute of Standards and Technology.

[25] CEA, "Reacteur OSIRIS" - Raport Descriptif, CEA-R-3984, Avril-1970.

[26] Silva, J. E. R. "*Elemento Combustível IEA-R1- Placa Combustível Interna*" CNEN/COPESP. São Paulo, Abr. 1995. (Desenho n<sup>o</sup> R19-IPN-213PR-2DJ-003. Rev. 4.

[27] Documentação de Qualificação–DQ-CCN-081-00, "*Elemento Combustível Padrão IEA-208*" Centro de Combustíveis Nucleares -IPEN/CNEN-SP, São Paulo, jan. 2010.

[28] Bergles, A. E., Rosenow, W. M. 1964, "**The determination of forced-convection surface boiling heat transfers**", Transactions of the ASME 86 (series C-J of Heat Transfer), pp. 365-375.

[29] Rodrigues, V. G., "*Mudança de configuração do núcleo do reator IEA-R1-Configuração 243*", IPEN/CNEN, São Paulo Relatório Técnico – GRUPO DE CÁLCULO (CRPq), jan. 2010.

[30] Rodrigues, V. G., "Mudança de configuração do núcleo do reator IEA-R1-Configuração 245", IPEN/CNEN, São Paulo Relatório Técnico – GRUPO DE CÁLCULO (CRPq), out. 2010.

[31] Rodrigues, V. G., "*Mudança de configuração do núcleo do reator IEA-R1-Configuração 246*", IPEN/CNEN, São Paulo Relatório Técnico – GRUPO DE CÁLCULO (CRPq), mai. 2011.

[32] Barry, R. F., "*LEOPARD: A spectrum dependent non-spatial depletion code*, WCAP-3269-26, Westinghouse Electric Corporation, 1963.

[33] Barhen, J., Rhotenstein, W., Taviv, E. "*The HAMMER Code System Technion*", *NP-565*, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, 1978.

[34] LITTLE, W.W., HARDIE, R.W., "2DB User's Manual: Revision I", BNWL-831-Rev-1, Battelle Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA (1969).

[35] Fowler, T. B., Vondy, D. R., Cunningham, G. W., "*Nuclear reactor core analysis code: CITATION*", Oak Ridge National Laboratory, ORNL-TM-2496, 1972.