AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Experimentos de Perda de Refrigerante Total e Parcial no Reator IEA-R1

EDUARDO MAPRELIAN

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

**Orientadora:
Profa. Dra. Gaianê Sabundjian**

**São Paulo
2018**

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

Experimentos de Perda de Refrigerante Total e Parcial no Reator IEA-R1

EDUARDO MAPRELIAN

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

Orientadora:
Profa. Dra. Gaianê Sabundjian

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

São Paulo
2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu amado Deus; o único Deus. Ele que é o meu Pai, o meu Senhor e o meu Consolador.

Ao olhar para cada etapa atravessada neste trabalho, concluo e declaro com toda a sinceridade que só o fiz pela força, capacitação e sabedoria do Senhor, e não pela minha própria. Pude experimentar da graça, misericórdia e amor do Pai.

Verdadeiramente no Senhor estão toda a sabedoria e todo conhecimento, como está escrito na Palavra de Deus:

“...para conhecimento do mistério de Deus, que é Cristo, em quem estão ocultos todos os tesouros da sabedoria e do conhecimento. ”

Colossenses 2:2b e 3

Também, Senhor, muito mais que qualquer título ou prêmio, Contigo está minha recompensa e meu galardão:

“Eis que o SENHOR Deus virá com poder, e o seu braço dominará; eis que o seu galardão está com ele, e diante dele vem a sua recompensa.”

Isaías 40:10

E ainda, Senhor, recebe toda a Honra e toda a Glória, deste trabalho. De fato, Senhor, elas pertencem sempre a Ti em tudo e por tudo.

“Porque Dele, e por meio Dele, e para Ele são todas as coisas. A Ele, pois, a glória eternamente. Amém! ”

Romanos 11:36

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos realmente são muitos.

Mas antes de tudo e de todos quero agradecer ao Alfa e Ômega, o Primeiro e o Último, o Senhor Jesus Cristo. Muito obrigado, Senhor, por tudo, do início ao fim. Por me sustentares com Tua força e graça, fé e perseverança. E por ter enviado cada ajuda tão preciosa e importante do início ao fim deste trabalho. Muito obrigado.

Agradeço à minha família tão amada, Alessandra, Victor Miguel e Vivan Petra, por todo apoio, ajuda, compreensão e oração, em todos os momentos deste trabalho. Reconheço o amor, a sabedoria, a força e a graça de Deus em suas vidas. Que o Pai os abençoe de maneira rica e transbordante.

Agradeço de coração à minha querida irmã, amiga e orientadora Gaianê. Ela sempre presente em tantos momentos importantes de minha vida espiritual e profissional. E minha gratidão especial por estar comigo nessa etapa. Que nosso Amado Pai a abençoe e recompense infinitamente mais por tudo o que você tem feito na minha vida.

Ao meu querido amigo Walmir, não existem palavras para lhe agradecer pelas tantas e tantas ajudas. Em todos os momentos do trabalho sua participação foi fundamental, do começo ao fim. Agradeço de todo o coração. Que o Senhor também o abençoe, recompense e prospere infinitamente mais.

A meu amigo Pedro por tantas e tantas ajudas a começar pela ideia de usar o ECI para fazer este trabalho. Muito obrigado mesmo. Também peço a Deus que o abençoe abundantemente.

Ao meu querido colega Belchior, também faltam palavras para lhe agradecer pela sua participação tão ativa e presente nos experimentos, nas conversas e na elaboração da planilha que calcula a potência de decaimento e na planilha de aquisição dos dados dos experimentos. Que o Senhor o abençoe e prospere grandemente e que o trabalho de suas mãos seja muitíssimo bem sucedido.

Aos gerentes do CEN, Ulisses e Leslie, por todo o apoio financeiro e administrativo. Que Deus os abençoe grandemente.

A meu amado amigo e irmão Hélio, por toda e tanta sábia ajuda, que foram tão importantes ao longo deste trabalho. Que seja renovada a Graça a e a Sabedoria de Deus em sua vida.

Aos colegas Samuel e Algeni, por tantas horas e horas de serviço, e ajuda. Samuel agradeço por cada ajuda, ideia e conselho. Que o Senhor os abençoe e prospere grandemente.

Agradeço aos colegas Adelk, Renato, Luiz Macedo e Zé Eduardo por tanta ajuda, realmente muito importante neste trabalho. Que Deus os abençoe ricamente.

Aos colegas do CEN, Antonio Teixeira, Adimir, Mitsuo, Roberto Navarro, Terremoto, Maria Alice, Delvonei, Alvin, Nicolau, Graciete, Gerson e Elza, agradeço por toda a ajuda e apoio. Deus os abençoe.

Aos colegas do Reator um agradecimento especial por tudo mesmo, Berretta, Alberto, Sidnei, Iglesias, Brito, Júlio, Marina, Mauro, Tonicarlos, Pires, Valdemir, Walter, Frederico, e tantos outros. Berretta também fico como que sem palavras, para lhe agradecer realmente por tudo. Tantas e tantas horas dedicadas, que o Senhor os abençoe, recompense e prospere abundantemente.

Ao pessoal da antiga oficina do IPEN em especial ao querido Mantovani por tantas e tantas ajudas efetivas neste trabalho, ao colega Adilson pelas calibrações tão importantes e ao Murilo pela solda realizada. MUITÍSSIMO obrigado e que Deus os abençoe grandemente.

Agradeço ao pessoal da proteção radiológica, Toyoda, Flavio, Aroldo, Gama e os demais que ajudaram na monitoração dos experimentos. Que o Senhor os abençoe.

Aos colegas do CTMSP, Vadim e Chrystophe por toda a ajuda tão importante no SAD do Reator. Que o Senhor os abençoe grandemente.

Agradeço aos colegas Arivaldo e Kurazumi por toda a ajuda e apoio na liberação de recursos junto à fundação PÁTRIA. Que Deus os abençoe.

Aos colegas Meldonian, Benedito e Antônio Souza, por toda a participação tão importante na liberação do experimento. Que o Senhor os abençoe.

Agradeço à querida Roberta pelas muitas ajudas e pela correção e revisão do trabalho. Muito obrigado por tudo mesmo. Que Deus a abençoe e prospere grandemente, especialmente na conclusão do teu trabalho.

Agradeço com carinho minha querida mãe Olga, a meu sogro Alexander e meu cunhado e irmão Alexandre, por toda e tanta preciosa oração e apoio. Agradeço também aos meus irmãos, cunhados e cunhadas por todo o apoio, oração, incentivo e força. Ao Alexandre (Lello) e à Kátia ainda um agradecimento muitíssimo especial pela impressão desta tese. Que o Senhor abençoe, guarde, fortaleça e prospere abundantemente, a todos vocês.

Agradeço aos membros titulares e suplentes da banca examinadora. Gaianê, Simões, Francisco, Marcelo, Walmir, Cabral, Eduardo, Jorge Baliño, Benedito e Delvonei, por toda a disponibilidade, contribuição e ajuda. Que Deus os abençoe e os recompense ricamente.

Enfim do início ao fim obrigado por tudo, Senhor, abençoa e prospera cada vida que contribuiu neste trabalho, que é para Tua Glória.

RESUMO

MAPRELIAN, Eduardo. *Experimentos de perda de refrigerante total e parcial no reator IEA-R1*. 2018. 186p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

A segurança de instalações nucleares é uma preocupação mundial que tem crescido, sobretudo, após o acidente nuclear de Fukushima. O estudo de acidentes em reatores nucleares de pesquisa tal como o Acidente de Perda de Refrigerante (APR), considerado por muitas vezes um acidente base de projeto, é importante para garantir a integridade da instalação. O APR pode levar ao descobrimento parcial ou total do núcleo do reator e, como condição de segurança, deve-se garantir que haja a remoção do calor de decaimento dos elementos combustíveis. Esse trabalho teve o objetivo de realizar experimentos de descobrimento parcial e total no Elemento Combustível Instrumentado (ECI), construído no Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares (IPEN), a fim de estudar os possíveis APRs em reatores de pesquisa. Uma seção de testes, denominada STAR, foi projetada e construída para simular os APRs. O ECI foi irradiado no núcleo do reator IEA-R1 (IPEN) e inserido na STAR, que ficou totalmente imersa na piscina do reator. No ECI, foram instalados termopares para medição das temperaturas do revestimento e do fluido em várias posições axiais e radiais. Foram realizados experimentos para cinco níveis de descobrimento do ECI, um total e quatro parciais, em duas condições distintas de calor de decaimento. Na análise dos resultados, verificou-se que os casos de descobrimento total foram os mais críticos, ou seja, as temperaturas do revestimento foram as maiores quando comparadas com os casos de descobrimentos parciais. Adicionalmente, foi realizada a simulação numérica de dois experimentos com o código RELAP5, cujos resultados demonstraram ótima concordância com os dos níveis experimentais, e temperaturas maiores que as experimentais. As máximas temperaturas do revestimento alcançadas em todos os experimentos ficaram bem abaixo da temperatura de empolamento do combustível, que é de 500°C. Assim, a STAR provou ser um aparato experimental seguro e confiável para a realização de experimentos de perda de refrigerante.

Palavras chave: acidentes de perda de refrigerante; circulação natural; código RELAP5; reatores de pesquisa.

ABSTRACT

MAPRELIAN, Eduardo. Total and partial loss of coolant experiments in the IEA-R1 reactor. 2018. 186p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

The safety of nuclear facilities has been a growing global concern mainly after the Fukushima nuclear accident. Studies on nuclear research reactor accidents such as the Loss of Coolant Accident (LOCA), considered many times a design basis accident, are important for guaranteeing the integrity of the plant. A LOCA may lead to the partial or complete uncovering of the fuel assemblies and assured decay heat removal is a safety condition. This work aimed to perform partial and complete uncovering experiments in the Instrumented Fuel Assembly (IFA) designed at the *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)* in order to study possible LOCAs in research reactors. A test section for experimental simulation of Loss of Coolant Accident named STAR was designed and built. The IFA was irradiated in the IEA-R1 and installed in the STAR, which was totally immersed in the reactor pool. Thermocouples were installed in the IFA to measure the clad and fluid temperatures in several axial and radial positions. The experiments were carried out for five levels of uncovering of IFA, being one complete uncovering and four partial uncovering, in two different conditions of decay heat. In the results analysis was observed that the cases of complete uncovering of the IFA were the most critical ones, that is, those cases presented higher clad temperatures when compared with partial uncovering cases. Additionally, a numerical simulation of two experiments was carried out by using the RELAP 5 code. The numerical results showed an optimum agreement with the experimental levels results and greater than the experimental temperatures. The maximum clad temperatures reached in all experiments were quite below the fuel blister temperature, which is 500 °C. Therefore, the STAR has proven to be a safe and reliable experimental apparatus for conducting loss of coolant experiments.

Key words: loss of coolant accident; natural circulation; RELAP5 code; research reactors.

SUMÁRIO

	<i>Página</i>
1. INTRODUÇÃO.....	20
1.1 - Objetivo do trabalho.....	22
1.2 - Originalidade do trabalho.....	22
1.3 - Organização da tese.....	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 - Fundamentação teórica	31
3.1.1 - Perda de refrigerante primário	31
3.1.2 - Calor de decaimento	31
3.1.3 - Mecanismos de transferência de calor	33
3.2 - Descrição dos experimentos.....	40
3.2.1 - Reator IEA-R1.....	41
3.2.2 - Descrição do Elemento Combustível Instrumentado (ECI).....	48
3.2.3 - Seção de testes de perda de refrigerante (STAR).....	52
3.2.4 - Configuração e operação dos experimentos	62
3.2.5 - Experimentos de perda de refrigerante com a STAR	66
4. RESULTADOS	80
4.1 - Comparação dos cinco níveis de descobrimento dos experimentos	80
4.2 - Comparação teórica e experimental	7102
5. CONCLUSÕES.....	107
6. TRABALHOS FUTUROS.....	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
APÊNDICE A – Detalhes adicionais da seção de testes STAR	117
A.1 – Detalhes adicionais da base da STAR.....	117
A.2 – Detalhes adicionais do casco da STAR	124
A.3 – Cálculo da força de empuxo na STAR.....	126
APÊNDICE B – Incertezas esperadas nas medidas	128
APÊNDICE C – Imagens do ECI E da STAR em um dos experimentos	133
APÊNDICE D – Comparação de experimentos de mesmo nível de descobrimento.....	136
D.1- Comparação entre os experimentos TOT-1 e TOT-2	136
D.2 - Comparação entre os experimentos PA-1 e PA-2	138

D.3 - Comparação entre os experimentos PB-1 e PB-2	141
D.4 - Comparação entre os experimentos PC-1 e PC-2.....	143
D.5 - Comparação entre os experimentos PD-1 e PD-2.....	145
APÊNDICE E – Resultados dos termopares do fluido.....	148
E.1– Comparação entre termopares do fluido e do revestimento.....	148
E.2– Comparações dos termopares do fluido nos cinco níveis	151
ANEXO 1 – Testes de calibração dos instrumentos e canais do SAD do IEA-R1	156
ANEXO 2 – Simulação teórica com o código RELAP5.....	165
AN.2.1 - Código RELAP5.....	165
AN.2.2 - Nodalização da STAR com o RELAP5.....	172
AN.2.3 - <i>Software for Uncertainty and Sensitivity Analysis (SUSA)</i>	177
AN.2.4 - Resultados obtidos da simulação teórica com o código RELAP5.....	178

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 3.1 - Características dos elementos combustíveis do reator IEA-R1	44
Tabela 3.2 - Principais condições termo-hidráulicas limitantes para o IEA-R1	46
Tabela 3.3 – Identificação e posição dos termopares do ECI.....	48
Tabela 3.4 – Distribuição de potência axial normalizada no ECI	64
Tabela 3.5 – Distribuição de potência radial normalizada no ECI	65
Tabela 3.6 - Descrição dos tempos dos experimentos TOT-1 e TOT-2	70
Tabela 3.7 - Descrição dos tempos dos experimentos PA-1 e PA-2	72
Tabela 3.8 - Descrição dos tempos dos experimentos PB-1 e PB-2	74
Tabela 3.9 - Descrição dos tempos dos experimentos PC-1 e PC-2.....	76
Tabela 3.10 - Descrição dos tempos dos experimentos PD-1 e PD-2.....	78
Tabela 4.1 – Variação percentual do calor do decaimento - EPRs do grupo 1.....	83
Tabela 4.2 – Variação percentual do calor do decaimento - EPRs do grupo 2.....	83
Tabela 4.3 – Níveis de esvaziamento e os respectivos tempos para os quatro pontos de observação – Experimentos do grupo 1.....	85
Tabela 4.4 – Níveis de esvaziamento e os respectivos tempos para os quatro pontos de observação – Experimentos do grupo 2.....	85
Tabela 4.5 - Níveis, desvio padrão, velocidades e tempos – Experimentos do grupo 1 ...	86
Tabela 4.6 - Níveis, desvio padrão, velocidades e tempos – Experimentos do grupo 2 ...	86
Tabela 4.7 – Comparações das máximas temperaturas dos termopares TC2; TC3 e TC4 - Grupo 1.....	90
Tabela 4.8 – Comparações das máximas temperaturas dos termopares TC2, TC3 e TC4 - Grupo 2.....	90
Tabela 4.9 – Comparações das máximas temperaturas dos termopares TC5, TC6 e TC7 - Grupo 1.....	94
Tabela 4.10 – Comparações das máximas temperaturas dos termopares TC5, TC6 e TC7 - Grupo 2.....	94
Tabela 4.11 – Comparações das máximas temperaturas dos termopares TC8, TC10 e TC12 - Grupo 1	97
Tabela 4.12 – Comparações das máximas temperaturas dos termopares TC8; TC10; TC12 - Grupo 2.....	97
Tabela 4.13 – Variações percentuais e diferença das temperaturas dos termopares TC6 e TC10 com o TC3 – Grupo 1.....	99
Tabela 4.14– Variações percentuais e diferença das temperaturas dos termopares TC6 e TC10 com o TC3 – Grupo 2.....	99
Tabela 4.15 – Comparação teórico/experimental das máximas temperaturas do termopar TC3 e das médias dos níveis nos experimentos TOT-1 e PD-1	105
 Tabela A.1 – Esforços nos olhais da seção STAR	 122
Tabela A.2 – Verificação da força empuxo na seção STAR.....	127
Tabela A.3 – Densidades dos materiais da STAR e da água.....	127
 Tabela B.1 - Calibração dos termopares do ECI.....	 129
Tabela B.2 - Médias e erros médios na calibração dos termopares do ECI	130
Tabela B.3 - Calibração dos canais e termopares do SAD	131
Tabela B.4 - Erro total ou incertezas dos termopares e canais do ECI no SAD	132

Tabela D.1- Comparações das temperaturas e do calor de decaimento dos experimentos TOT-2 e TOT-1	137
Tabela D.2– Comparações das temperaturas e do calor de decaimento dos experimentos PA-2 e PA-1	140
Tabela D.3 – Comparações das temperaturas e do calor de decaimento dos experimentos PB-2 e PB-1	142
Tabela D.4 Comparações das temperaturas e do calor de decaimento dos experimentos PC-2 e PC-1	144
Tabela D.5– Comparações das temperaturas e do calor de decaimento dos experimentos PD-2 com PD-1	146
 Tabela E.1 – Comparações das temperaturas dos TC8 e TF9; TC10 e TF11; TC12 e TF13 – Experimento TOT-1	150
Tabela E. 2– Comparações das máximas temperaturas dos termopares TF9, TF11 e TF13 - Grupo 1	152
Tabela E. 3- Comparações das máximas temperaturas dos termopares TF9, TF11 e TF13 - Grupo 2	152
Tabela E. 4 – Comparações entre as máximas temperaturas – TF14 – Grupos 1 e 2 ..	155
 Tabela AN.1. 1 – Canais do SAD usados pelo ECI	156
 Tabela AN.2.1 - Elementos mais utilizados em simulações de sistemas com o código RELAP5	168
Tabela AN.2.2 – Número que corresponde ao regime de escoamento – RELAP5	169
Tabela AN.2.3 – Números que correspondem os modos de transferência de calor e correlações usados pelo RELAP5	170
Tabela AN.2.4 - Opções para combinação de códigos computacionais e dados de entrada	171
Tabela AN.2.5- Correspondência entre os componentes do código/volumes de controle para o ECI	175

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 3.1– Perfis de Temperatura esperados nas placas e canais do ECI	35
Figura 3.2 - Convecção natural no EC (ECI) - Experimento	37
Figura 3.3 - Convecção natural no ECI - Experimento de perda	39
Figura 3.4 – Vista do saguão da piscina e do núcleo do reator IEA-R1	41
Figura 3.5 - Representação esquemática do núcleo e estruturas do IEA-R1	43
Figura 3.6 - Elemento combustível padrão - fabricação IPEN/CNEN-SP	45
Figura 3.7 - Placas combustíveis e canais de resfriamento dos ECPs do IEA-R1	47
Figura 3.8 - Ilustração da fabricação dos ECP do IPEN	47
Figura 3.9 – Representação esquemática do ECI	48
Figura 3.10 – Detalhe da pastilha com os termopares do ECI	49
Figura 3.11 – Detalhe esquemático da montagem dos termopares do ECI	50
Figura 3.12 – ECI antes de ser irradiado e detalhe das folgas do bocal	50
Figura 3.13 – Detalhe do tubo flexível dos termopares do ECI	51
Figura 3.14 – Detalhes do bocal superior do ECI	51
Figura 3.15 - Base da STAR	53
Figura 3.16 - Base da STAR com elemento <i>dummy</i>	54
Figura 3.17 - Detalhe do casco, sua montagem sobre a base, detalhes do rasgo e da porca	55
Figura 3.18 - Fluxograma do Sistema de Ar Comprimido da STAR	56
Figura 3.19 - Medidor <i>Validyne</i> modelo DP15	58
Figura 3.20 - Tela do SAD do IEA-R1 com painel da seção STAR	59
Figura 3.21 - Sala de controle do IEA-R1 com o SAD	59
Figura 3.22 - Localização aproximada STAR na piscina do reator IEA-R1	60
Figura 3.23 - Cotas da STAR na piscina do reator IEA-R1	61
Figura 3.24 - Instalação da base da seção STAR na piscina do reator IEA-R1	62
Figura 3.25 - Teste de Comissionamento da STAR na piscina do reator IEA-R1	62
Figura 3.26 – Configuração do núcleo do Reator IEA-R1 com o ECI	63
Figura 3.27 – Distribuição de potência axial normalizada no ECI	65
Figura 3.28 - Ilustração do nível e das condições de observação de um EPR	68
Figura 3.29 - Níveis dos dez EPRs da STAR	69
Figura 3.30 - Ilustração dos experimentos 1 e 2 - TOT-1 e TOT-2	70
Figura 3.31 - Ilustração dos experimentos PA-1 e PA-2	71
Figura 3.32 - Convecção natural no ECI – Experimentos PA-1/2	72
Figura 3.33 - Ilustração dos experimentos PB-1 e PB-2	73
Figura 3.34 - Convecção natural no ECI – Experimentos PB-1/2	74
Figura 3.35 - Ilustração dos experimentos PC-1 e PC-2	75
Figura 3.36 - Convecção natural no ECI – Experimentos PC-1/2	77
Figura 3.37 - Ilustração dos experimentos PD-1 e PD-2	78
Figura 4.1 – Calor de decaimento dos experimentos do grupo 1 - Transiente total	81
Figura 4.2 – Calor de decaimento dos experimentos do grupo 1 – Condição estacionária	81
Figura 4.3 – Calor de decaimento dos experimentos do grupo 2 - Transiente total	82
Figura 4.4 - Calor de decaimento dos experimentos do grupo 2 - Condição estacionária	82
Figura 4.5 – Níveis dos experimentos do grupo 1	84
Figura 4.6 – Níveis dos experimentos do grupo 2	84
Figura 4.7 – Curvas das temperaturas do TC3 nos experimentos do grupo 1	88
Figura 4.8 – Curvas das temperaturas do TC3 nos experimentos do grupo 2	89

Figura 4.9 – Temperaturas máximas do TC3 para cada um dos 10 experimentos – Grupos 1 e 2	91
Figura 4.10 – Temperaturas do TC6 para cada um dos experimentos do grupo 1	93
Figura 4.11 - Temperaturas do TC6 para cada um dos experimentos do grupo 2.....	94
Figura 4.12 – Temperaturas máximas do TC6 para cada um dos 10 experimentos – Grupos 1 e 2.....	95
Figura 4.13 – Temperaturas do termopar TC10 para cada um dos experimentos do grupo 1	96
Figura 4.14 – Temperaturas do termopar TC10 para cada um dos experimentos do grupo 2	97
Figura 4.15 – Temperaturas máximas do TC10 para cada um dos 10 experimentos.....	98
Figura 4.16 – Comparação das variações percentuais das temperaturas e fatores de potência	100
Figura 4.17 – Comparação das variações percentuais das temperaturas e fatores de potência dos termopares TC6 e TC10 com o TC3 - Grupo 2	100
Figura 4.18 – Comparação teórico experimental dos níveis e temperaturas do TOT-1	103
Figura 4.19 - Comparação teórico experimental dos níveis e temperaturas do PD-1	104
Figura A.1 - Palete de alumínio Alutent na medida padrão	117
Figura A.2 – Dois paletes de alumínio da base da STAR.....	118
Figura A.3 – Bloco de chumbo e aço carbono – desenho esquemático	118
Figura A.4 – Caixa envoltória de alumínio com bloco de chumbo e aço.....	119
Figura A.5 – Detalhe do bocal de alumínio da base da STAR.....	119
Figura A.6 – Base com detalhe do bocal e do elemento <i>dummy</i>	120
Figura A. 7– Detalhe da calha dos cabos do ECI	120
Figura A.8 – Detalhe do olhal da base da STAR	121
Figura A.9 – Olhais de içamento – DIN 580 – dimensões e cargas máximas.....	121
Figura A.10 – Porca especial de fechamento.....	123
Figura A.11 – Casco da STAR no dia da montagem na piscina do reator IEA-R1.....	124
Figura A.12 – Montagem do casco na piscina do Reator IEA-R1	125
Figura C.1 – Reator em operação e detalhe da base da seção STAR	133
Figura C.2 – Retirada do ECI do núcleo e sua transferência para a STAR	134
Figura C.3 – Colocação do ECI na base da STAR.....	134
Figura C4 – ECI na STAR e núcleo do IEA-R1	135
Figura C.5 – Colocação do casco sobre a base da STAR.....	135
Figura D.1– Evoluções temporais das temperaturas do termopar TC3 e dos níveis de descobrimento dos experimentos TOT-1 e TOT-2	137
Figura D.2 – Comparações das variações percentuais das temperaturas e do calor de decaimento e das relações dos experimentos TOT-2 e TOT-1 —Transiente total	138
Figura D.3 - Evoluções temporais das temperaturas do termopar TC3 e dos níveis de descobrimento dos experimentos PA-1 e PA-2.....	139
Figura D.4 – Comparação das variações percentuais das temperaturas e do calor de decaimento e das relações dos experimentos PA-2 e PA-1 – Transiente total.....	140
Figura D.5 – Evoluções temporais das temperaturas do termopar TC3 e dos níveis de descobrimento dos experimentos PB-1 e PB-2.....	141
Figura D.6 – Comparações das variações percentuais das temperaturas e das relações dos experimentos PB-2 e PB-1 – Transiente total	142
Figura D.7 – Evoluções temporais das temperaturas do termopar TC3 e dos níveis de descobrimento dos experimentos PC-1 e PC-2	143

Figura D.8- Comparações das variações percentuais das temperaturas e das relações dos experimentos PC-2 e PC-1 – Transiente total.....	144
Figura D.9 – Temperaturas do termopar TC3 e dos níveis de descobrimento dos experimentos PD-1 e PD-2.....	145
Figura D.10 – Comparações das variações percentuais das temperaturas e das relações dos experimentos PD-2 e PD-1 – Transiente total.....	146
Figura E.1 – Comparação das temperaturas dos termopares TC8 e TF9 – Experimento TOT-1	148
Figura E.2 – Comparação das temperaturas dos termopares TC10 e TF11 – Experimento TOT-1	149
Figura E.3 – Comparação das temperaturas dos termopares TC12 e TF13 – Experimento TOT-1	149
Figura E.4 - Temperaturas do termopar TF11 para os experimentos do Grupo 1	151
Figura E. 5– Temperaturas do termopar TF11 para os experimentos do Grupo 2	152
Figura E. 6– Curvas das temperaturas do TF14 nos experimentos do Grupo 1	154
Figura E. 7– Curvas das temperaturas do TF14 nos experimentos do Grupo 2	154
Figura AN.1.1 – Calibração dos canais T6, T7 e T8 do SAD.....	157
Figura AN.1.2 – Calibração dos canais T9, T10 e T11 do SAD.....	158
Figura AN.1.3 – Calibração do canal T12 do SAD (ignorar os canais Delta T3 e T13).....	159
Figura AN.1.4 – Calibração do canal T14 do SAD (ignorar canais T15 e T16).....	160
Figura AN.1.5 – Calibração dos canais T20 e T5_EI do SAD (ignorar canal T2_EI).....	161
Figura AN.1.6 – Calibração do canal T21 do SAD (ignorar canais Delta B e Delta A).....	162
Figura AN.1.7 – Calibração dos canais T3_EI e T4_EI do SAD (ignorar o Delta T5).....	163
Figura AN.1.8 – Calibração do nível da piscina do IEA-R1	164
Figura AN.2. 1– Modelagem do Elemento Combustível Instrumentado (ECI) – RELAP5.....	173
Figura AN.2. 2– Modelagem casco cilíndrico em aço-inoxidável – RELAP5	174
Figura AN.2.3 – Temperatura do termopar TC3 (TOT-1) - RELAP5/experimental	179
Figura AN.2.4 – Nível de fluido no sino (TOT-1) - RELAP5/experimental.....	180
Figura AN.2.5 – Temperatura do fluido no canal conectado ao TC3 (TOT-1) - RELAP5.....	180
Figura AN.2.6 – Fração de vazio do canal conectado ao TC3 (TOT-1) - RELAP5	181
Figura AN.2.7 – Regime de escoamento do canal conectado ao TC3 (TOT-1) - RELAP5.....	181
Figura AN.2.8 – Modo de transferência de calor do canal conectado ao TC3 (TOT-1)/RELAP5.....	182
Figura AN.2.9 - Temperatura do termopar TC3 (PD-1) - RELAP5/experimental	183
Figura AN.2. 10 – Nível de fluido no sino (PD-1) - RELAP5/experimental.....	183
Figura AN.2. 11 – Temperatura do fluido no canal conectado ao TC3 (PD-1) - RELAP5.....	184
Figura AN.2.12 – Fração de vazio do canal conectado ao TC3 (PD-1) - RELAP5	185
Figura AN.2.13 – Regime de escoamento do canal conectado ao TC3 (PD-1) - RELAP5.....	185
Figura AN.2.14 – Modo de transferência de calor do canal conectado ao TC3 (PD-1) RELAP5.....	186

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

3D-AIRLOCA – Programa do *Argonne National Laboratory*;

ABP - Acidente Base de Projeto;

ACCUM – Acumulador (na modelagem como o RELAP5);

A. e. – Aquecimento e expansão;

AIEA - Agência Internacional de Energia Atômica;

APR – Acidente de Perda de Refrigerante;

APRPGR - Acidente de Perda de Refrigerante Primário por Grande Ruptura;

APRPR - Acidente de Perda de Refrigerante Primário por Pequena Ruptura;

ASTR - *Aerospace Systems Test Reactor*;

BEPU – *Best Estimate Plus Uncertainty*. Desenvolvido pela Universidade de Pisa;

BH-3 - Tubo colimador 3 (*Beam-Hole*);

BRANCH - Conector com várias saídas (na modelagem como o RELAP5);

BWR- Reator a Água em Ebulição (*Boiling Water Reactor*);

CANDU - Reator *CANada Deuterium Uranium*

CFR - *Code of Federal Regulations*;

CHF – *Critical Heat Flow*;

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear;

CRPq - Centro do Reator de Pesquisas;

EC-208 – Elemento combustível produzido no IPEN, com número sequencial 208;

ECC - Elementos combustíveis de controle;

ECI - Elemento Combustível Instrumentado;

ECP - Elemento Combustível Padrão;

EPR – Experimento de Perda de Refrigerante;

Est. condição estacionária de nível constante;

Ex - expansor

EXCEL – Planilha eletrônica da Microsoft Corporation;

IAEA - *International Atomic Energy Agency*;

IEA-R1 – Primeiro reator nuclear do IPEN;

IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares;

KUR - *Kyoto University Research Reactor*;

LITR - *Low Intensity Testing Reactor*;

LPTR - *Livermore Pool Type Reactor*;

MSA - *Mine Safety Appliance Company*;

MTR - *Material Test Reactor*;

ORR - *Oak Ridge Reactor*;

PA-1 e PA-2 – Experimentos de perda de refrigerante com descobrimento do ECI é o primeiro nível de descobrimento parcial;

PB-1 e PB-2 – Experimentos de perda de refrigerante com descobrimento do ECI até o segundo nível de descobrimento parcial;

PC-1 e PC-2 – Experimentos de perda de refrigerante com descobrimento do ECI até o terceiro nível de descobrimento parcial;

PD-1 e PD-2 – Experimentos de perda de refrigerante com descobrimento do ECI até o quarto nível de descobrimento parcial;

PIPE – Tubulação (na modelagem como o RELAP5);

PUMP - Bomba (na modelagem como o RELAP5);

PWR – Reator a Água Pressurizada (*Pressurizer Water Reactor*);

R. c. - resfriamento e compressão;

RELAP5 – Código computacional do *Idaho National Engineering Laboratory*;

RMB - Reator Multipropósito Brasileiro;

RNP - Reatores Nucleares de Pesquisa;

SAC - Sistema de Ar Comprimido;

SAD – Sistema de Aquisição de Dados;

SEPARATOR - Separadores de vapor (na modelagem como o RELAP5);

SFRRI - *Swiss Federal Reactor Research Institute*;

SNGLJUN - Junção Simples (na modelagem como o RELAP5);

SNGLVOL - Volume simples (na modelagem como o RELAP5);

SRE - Sistema de Resfriamento de Emergência;

STAR - seção de testes de perda de refrigerante;

SUSA - Software for Uncertainty and Sensitivity, desenvolvido pela *Global Research for Safety* (GRS)

SVAC – Sistema de Ventilação e Ar Condicionado do reator;

TEMPLOCA – Programa do IPEN para acidente de perda de refrigerante;

TMDPJUN - Junção dependente do tempo (na modelagem como o RELAP5);

TMDPVOL - Volume dependente do tempo (na modelagem como o RELAP5);

TOT-1 e TOT-2 – experimentos de descobrimento total do ECI;

TR-2 – Reator nuclear de pesquisas da Turquia;

Tra – Transiente total

Va-i - Válvula do SAC;

VALVE – Válvula (na modelagem como o RELAP5);

VC – Valores convencionais.

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_{cas} – área interna do casco da seção STAR (m^2);
 A_{eECI} – área externa do ECI (m^2);
 A_p – área da seção transversal da placa (m^2);
 c_l – calor específico do líquido saturado ($J/kg\ K$);
 c_p – calor específico do fluido (ar) ($J/kg\ K$);
 C_{sf} – constante determinada de valores experimentais;
 D_h – diâmetro hidráulico (m);
 e_c – espessura do cerne (m);
 e_{cr} – espessura do canal de resfriamento (m).
 e_r – espessura do revestimento (m);
 E_{STAR} - força de empuxo na seção STAR (N);
 f_r – fator de potência radial médio;
 g – aceleração da gravidade ($9,8\ m/s^2$);
 G_r – Número de Grashov;
 H - calor de decaimento do reator (W);
 H_{ECI} - calor de decaimento gerado no ECI (W);
 $H_{ECI_{CF}}$ - calor de decaimento dissipado por convecção forçada (W);
 $H_{ECI_{Ebulição}}$ - calor de decaimento dissipado por ebulição (W).
 $H_{ECI_{ex}}$ - calor de decaimento do ECI dissipado por convecção natural nas faces externas do ECI (W);
 $H_{ECI_{in}}$ - calor de decaimento do ECI, dissipado por convecção natural nos canais internos do ECI (W);
 $H_{ECI_{RT}}$ - calor de decaimento do ECI dissipado por radiação térmica (W);
 h_{ex} - coeficiente de transmissão de calor por convecção natural nas faces externas do ECI ($W/m^2\ K$);
 h_{in} – coeficiente de transmissão de calor por convecção natural interna dos canais do ECI ($W/m^2\ K$);
 h_{lv} – entalpia específica de vaporização (J/kg);
 k_{cb} – condutividade térmica do combustível ($W/m\ K$);
 k_f - condutividade térmica do fluido (ar) ($W/m\ K$);
 k_r – condutividade térmica do revestimento de alumínio ($W/m\ K$);

$m_{STAR\ i}$ - massa dos componentes da STAR submersos na piscina (kg);

m_i - massa dos objetos da STAR submersos na piscina (kg);

$m_{m\acute{a}x}$ – massa máxima permitida por olhal (kg);

m_{STAR} – massa da seção STAR;

n_{EC} – número total de elementos combustíveis e de controle;

n_{pc} – número de placas combustíveis do ECI;

P – pressão (Pa);

$P_{e\ m\acute{a}x}$ – carga máxima ou peso máximo permitido por olhal (N).

$P_{e\ STAR}$ - força peso na seção STAR (N).

$P_{e\ STAR}$ - força peso na seção STAR (N);

P_{ot} - potência de operação do reator (W);

P_r – Número de Prandtl

$P_{r_{lv}}$ – número de P_r do liquido saturado

Q – calor de decaimento do reator (W);

q_{in} – potência de decaimento dissipada em meia placa (W);

T – temperatura (K);

t_1 - tempo de decaimento aproximado de 1:20 h;

t_{1e} - tempo de decaimento aproximado de 1:30 h;

t_2 - tempo de decaimento aproximado de 3:20 h;

t_{2e} - tempo de decaimento aproximado de 3:30 h;

T_c – temperatura do revestimento (K);

TC_i – Termopar para medição de temperatura do revestimento do ECI

t_d - tempo de decaimento (s);

t_d - tempo de decaimento (s);

t_{dd} - tempo de decaimento (dias).

T_f – temperatura do fluido (K);

TF_i – Termopar para medição de temperatura do fluido no ECI;

t_i - tempo de irradiação (ou de operação) (s);

t_i - tempo de irradiação (ou de operação) (s);

T_m – temperatura no centro do combustível (K);

T_{p1} – temperatura da face externa do ECI (K);

T_{p2} – temperatura da face interna do casco da seção STAR (K).

T_s – temperatura na fronteira entre o combustível e o revestimento (K);

T_{sat} – temperatura de saturação da água na altura da seção STAR (K)
 u – velocidade na direção x (m/s);
 v - velocidade de escoamento por circulação natural na direção y (m/s);
 $V_{i\ STAR}$ - volume dos componentes da STAR submersos na piscina (m³);
 $V_{i\ STAR}$ - volume dos objetos da STAR submersos na piscina (m³);
 α – difusividade térmica (m²/s);
 β – emissão de radiação beta (MeV/s-f);
 β_t – coeficiente de expansão térmica do fluido (ar) (1/K);
 γ – emissão de radiação gama (MeV/s-f);
 ΔT_x – excesso de temperatura (K)
 ϵ_{cas} – emissividade do casco da STAR;
 ϵ_{ECI} – emissividade do ECI;
 μ – viscosidade dinâmica (N.s/m²);
 μ_l – viscosidade dinâmica do líquido (N.s/m²);
 ρ – densidade do fluido (kg/m³);
 ρ_a - densidade da água da piscina no sistema internacional (kg/m³).
 ρ_l – densidade do líquido saturado (kg/m³);
 ρ_v – densidade do vapor saturado (kg/m³);
 σ – constante de Stefan-Boltzman – (5,67×10⁻⁸ W/m²K⁴);
 τ - tensão superficial da interface liquido-vapor (N/m).

1. INTRODUÇÃO

Com o intuito de garantir a segurança da população em torno de plantas nucleares de pesquisa ou de potência, a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) ou *International Atomic Energy Agency* (IAEA) vem atuando fortemente junto aos órgãos licenciadores dos países que possuem instalações nucleares. Essa preocupação acentua-se diante de qualquer acidente que ocorra em reatores nucleares no mundo. Foi assim com os acidentes de *Three Mile Island* (UNITED STATES NATIONAL REGULATORY COMMISSION, 1980) e de *Chernobyl* (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1996) e agravou-se com o de *Fukushima* (TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, 2012). Esse último ocasionou graves consequências à população em torno das usinas nucleares e às cidades próximas, gerando insegurança e medo com relação às instalações nucleares atualmente em operação. Portanto, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), órgão regulatório brasileiro, tem realizado esforços na prevenção de acidentes em instalações nucleares para assegurar a sua integridade.

Os órgãos reguladores do mundo incluíram estudos teóricos dos acidentes considerados como base de projeto em seus relatórios de análise de segurança de reatores nucleares. Os Acidentes de Perda de Refrigerante (APR) são considerados, por muitas vezes, como um acidente base de projeto nestes reatores.

Após o acidente de *Fukushima*, os acidentes de condição estendida de projeto (acidentes severos) deverão ser incluídos nos relatórios de análise de segurança de plantas nucleares.

A AIEA definiu três funções básicas de segurança para as instalações nucleares: o desligamento seguro do reator, o resfriamento adequado do calor de decaimento dos elementos combustíveis e o confinamento do material radioativo (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2005, 2008).

Em caso de desligamento do reator para manutenção ou devido à ocorrência de um transiente ou acidente, ainda há geração de calor residual no núcleo do reator. Essa potência é gerada imediatamente após o desligamento do reator e decai exponencialmente com o tempo. Esse calor é proveniente dos

produtos de fissão que estão contidos nos elementos combustíveis. Portanto, para garantir a segurança da instalação, esse calor de decaimento deve ser retirado por meio de sistemas de segurança projetados para esse fim.

Em Reatores Nucleares de Pesquisa (RNP) do tipo piscina como o IEA-R1 (MAIORINO et al., 1998), instalado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), o núcleo do reator está imerso em uma piscina de água desmineralizada, que garante a remoção segura do calor de decaimento após o desligamento do reator. A remoção do calor ocorre de maneira passiva pela circulação natural da água, sem depender de fontes externas de energia, durante o tempo necessário para manter a integridade física dos elementos combustíveis e garantir o confinamento do material radioativo. Nesse caso, se houver a ocorrência de um APR, é fundamental assegurar a função básica de segurança de remoção de calor residual para garantir a integridade do combustível. Este tipo de acidente pode levar a uma perda parcial ou total da água da piscina ou tanque, em caso de reator de pesquisa, ou da água do vaso de pressão, para um reator de potência, com consequente descobrimento parcial ou total dos elementos combustíveis.

Dependendo da potência, do tempo de operação e do tempo de esvaziamento, um acidente de perda de refrigerante em um reator nuclear de pesquisa com o descobrimento total do núcleo poderá levar à fusão do mesmo, se não houver a atuação de algum sistema de remoção de calor residual. Neste caso, as principais formas de remoção do calor são por meio da radiação térmica e da convecção natural do ar nos elementos combustíveis (HAMIDOUCHE; SI-AHMED, 2011).

Quando há descobrimento parcial do núcleo, há obstrução da circulação do ar nas placas internas dos elementos combustíveis e, dependendo do nível de descobrimento e da potência de decaimento, pode ocorrer uma condição ainda mais severa do que a que acontece quando há descobrimento total do núcleo (BOUSBIA-SALAH et al, 2006, WETT, 1960). Para níveis maiores de descobrimento parcial temos uma condição mais favorável com uma maior remoção do calor pela água de cobertura.

No intuito de aprofundar as pesquisas científicas realizadas nesta área, foi idealizado um experimento para simular um acidente de perda de refrigerante utilizando o Elemento Combustível Instrumentado (ECI), projetado para o reator IEA-R1 e desenvolvido no IPEN (UMBEHAUN, 2016). Esse experimento visa possibilitar

a análise do comportamento da remoção de calor residual de um elemento combustível em caso de acidentes de perda de refrigerante em reatores de pesquisa durante os seguintes cenários: descobrimento total e parcial do núcleo e reenchimento.

Esse é um tema de fundamental importância na análise de segurança de reatores de pesquisa.

1.1 - Objetivo do trabalho

Este tese tem como objetivo realizar experimentos de perda de refrigerante utilizando o ECI, projetado para o reator IEA-R1, e a seção de testes de perda de refrigerante, denominada STAR, para verificar o comportamento da temperatura das placas combustíveis para cinco níveis de descobrimento do ECI, em duas condições de calor de decaimento. Os experimentos de perda de refrigerante têm a proposta de simular condições reais destes tipos de acidentes em reatores de pesquisa. Por meio desses experimentos são obtidos os seguintes parâmetros: os níveis de descobrimento e as temperaturas do revestimento e do fluido do ECI em função do tempo para cada um dos cenários analisados.

Uma vez obtidos os resultados experimentais, esses foram comparados com os valores alcançados com a modelagem teórica da STAR realizada com o código RELAP5/MOD3.2GAMMA (IDAHO NATIONAL ENGINEERING LABORATORY, 1999). A finalidade dessa simulação teórica é reproduzir os experimentos realizados nesse trabalho e verificar se os modelos de transferência de calor existentes nessa ferramenta de cálculo são adequados para descrever o fenômeno de convecção natural.

1.2 - Originalidade do trabalho

A originalidade desse trabalho consiste na simulação e comparação entre os acidentes de perda de refrigerante total e parcial no ECI utilizando, para isso, a seção de testes de perda de refrigerante STAR, desenvolvida nesse estudo.

O procedimento experimental adotado nesse trabalho é original por ser realizado dentro da piscina do reator IEA-R-1, sem a necessidade de uma blindagem adicional de chumbo ou concreto, proporcionando mais segurança para os operadores, pesquisadores e para o próprio ECI.

Outro aspecto de originalidade é o controle do nível de descobrimento do ECI, que é realizado utilizando um sistema de ar comprimido e um medidor de pressão diferencial. Este sistema permite o controle das velocidades de descobrimento e de reenchimento ou remolhamento do ECI. O ECI utilizado em todos os experimentos é semelhante ao Elemento Combustível Padrão (ECP) do IEA-R1, em condições reais de distribuições de fluxo de calor axial e radial e de calor de decaimento.

A principal motivação desse trabalho é gerar importantes resultados na área de análises de acidentes em reatores de pesquisa em caso de APR para fins de licenciamento desse tipo de instalação.

1.3 - Organização da tese

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica de experimentos de acidentes de perda de refrigerante em elementos combustíveis de reatores nucleares de pesquisa.

O capítulo 3 descreve a fundamentação teórica envolvida nos experimentos de perda de refrigerante da seção de testes STAR e do ECI. São fornecidas, também, as descrições: do reator de pesquisas IEA-R1, do ECI, da seção STAR e dos dez experimentos de perda de refrigerante.

No capítulo 4, são apresentados e comparados os resultados dos experimentos de perda de refrigerante realizados na STAR. É fornecida, também, uma comparação teórica e experimental com o código RELAP5 com base nas informações fornecidas no ANEXO 2.

O capítulo 5 apresenta as discussões, as conclusões dos resultados experimentais e teóricos obtidos nesse trabalho.

No capítulo 6, são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, são fornecidas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

O APÊNDICE A apresenta as informações complementares da seção de testes STAR.

No APÊNDICE B, são fornecidas as incertezas esperadas para as temperaturas dos termopares do ECI, para o nível de água na piscina do IEA-R1 e para o medidor do nível de água na STAR.

O APÊNDICE C mostra os registros das imagens do ECI e da STAR em um dos dias da realização de um experimento.

No APÊNDICE D, são fornecidos os resultados das comparações entre os experimentos de mesmo nível de descobrimento.

O APÊNDICE E apresenta os resultados dos termopares do fluido do ECI para os experimentos de perda de refrigerante realizados.

No ANEXO 1, são exibidos os testes de calibração dos canais do SAD do IEA-R1 que foram usados pelos termopares do ECI. Estes testes foram realizados pela empresa CONTEMP (CONTEMP, 2016).

O ANEXO 2, de autoria de SABUNDIJIAN (2017)¹ fornece uma breve descrição do código RELAP5, a nodalização da STAR e do ECI, os resultados obtidos com esse programa computacional e a comparação com os resultados experimentais.

¹ Simulação teórica com o RELAP5, fornecida por SABUNDIJIAN, G. em 2017.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na literatura, foram encontrados poucos trabalhos experimentais que relatam simulações de perda de refrigerante em reatores de pesquisa. Consequentemente, não há uma grande disponibilidade de resultados que possam ser comparados com cálculos realizados por meio de programas de análise termo-hidráulica.

A seguir, são apresentados alguns trabalhos que descrevem experimentos de perda de refrigerante primário em reatores de pesquisa.

De 1951 a 1953, foram realizados vários experimentos de perda de refrigerante no reator *Low Intensity Testing Reactor* (LITR) do *Oak Ridge National Laboratory*. O objetivo dos testes foi determinar o aumento de temperatura dos seus elementos combustíveis devido ao calor de decaimento dos produtos de fissão, enquanto a água de refrigeração era drenada rapidamente do próprio reator (COX; WEBSTER, 1964). Os testes incluíram três níveis de potência de operação: 1,0 e 1,25 MW, sem resfriamento auxiliar, e 2,3 MW, com a atuação do sistema de resfriamento auxiliar. Nesse trabalho não há informação sobre a realização de experimentos com descobrimentos parciais.

Com base nos resultados experimentais, concluiu-se que o LITR necessitava da operação de um sistema de resfriamento auxiliar com aspersores para garantir a segurança dos combustíveis nas condições de perdas rápidas do refrigerante do reator após operações em níveis de potência próximos de 3 MW. Esse sistema de resfriamento passivo conseguiu evitar a fusão do combustível de forma satisfatória.

Embora não fosse o objetivo principal do trabalho de COX e WEBSTER (1964), foi realizado um registro dos níveis de radiação em vários pontos próximos ao reator durante o último teste a 2,3 MW de potência. Foi observada a presença de um cone de alta intensidade de radiação sobre o núcleo do reator (WEBSTER, 1967). Mesmo com a perda da blindagem da água devido ao esvaziamento da piscina, não foi mencionada a colocação de nenhuma blindagem adicional.

Uma série de testes de perda de refrigerante foi realizada em 1959 no *Oak Ridge Reactor* (ORR), com a finalidade de avaliar a temperatura máxima atingida em seus elementos combustíveis que foram retirados do núcleo e ficaram

suspensos no ar (WETT, 1960). Os testes foram realizados em uma célula quente do reator, com monitoração do controle do ar interno e da radiação externa a ela. Muito provavelmente, os elementos combustíveis foram retirados da piscina para serem colocados na célula quente, gerando dificuldades adicionais na blindagem durante os transportes.

A partir desses resultados e com os dados obtidos dos testes realizados no reator LITR, foi desenvolvida uma correlação para o cálculo da temperatura máxima do combustível no núcleo quando exposto ao ar e sem nenhuma obstrução à circulação natural. Essa correlação foi utilizada no programa TEMPLOCA (MAPRELIAN, 1998), desenvolvido no IPEN-CNEN/SP para a análise de APR em elementos combustíveis do tipo *Materials Testing Reactor* (MTR). Esse programa foi utilizado na análise de acidentes do reator IEA-R1 (INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2005).

No trabalho sobre o reator de *Oak Ridge* foi mencionado um estudo realizado pela *Mine Safety Appliance Company* (MSA) - *Research Corporation* em elementos de aço inox aquecidos por indução, semelhantes aos do ORR, no qual se verificou que as temperaturas subiam de forma descontrolada quando os elementos estavam imersos parcialmente em água em níveis de descobrimento menores do que 30% do comprimento aquecido total (WETT, 1960). Não foram fornecidas informações sobre o perfil axial de potência utilizado neste experimento. Em um elemento combustível real, o perfil axial é próximo de uma curva cossenoidal.

Foi feita, ainda, uma verificação dos efeitos da imersão parcial em dois elementos combustíveis do ORR para vários níveis de imersão, cujos resultados foram comparados com os elementos expostos ao ar (WETT, 1960). Nessas condições analisadas, não foram observadas temperaturas elevadas, tanto no caso dos elementos combustíveis imersos como nos elementos expostos ao ar. Nesses dois testes de submersão ou descobrimento parcial, aparentemente, não foi utilizada a célula quente dos experimentos de descobrimento total ou alguma seção de testes.

Outro teste de perda de refrigerante foi realizado no reator *Livermore Pool Type Reactor* (LPTR) de 2 MW (WEBSTER, 1967). Esse teste foi executado no próprio reator e teve como objetivo principal a medição dos níveis de radioatividade em regiões próximas ao vaso do reator, quando da perda da água da piscina. Nesse caso, a água da piscina foi drenada até atingir o nível do topo do núcleo e não foram

efetuados nem o descobrimento parcial e nem o total do núcleo. Nesse teste, foi verificada a ocorrência de um cone de alta intensidade de radioatividade sobre o núcleo do reator.

O Laboratório de *Los Alamos* realizou uma série de testes de imersão parcial em um elemento *dummy*, que simula um elemento combustível real (WENZEL; ARNOLD, 1970). O elemento *dummy* foi disposto dentro de um tubo de vidro e, externamente ao tubo, foi colocada uma resistência elétrica em formato de espiral para o aquecimento por indução. A espiral tentou simular um perfil axial de potência semelhante ao de elementos combustíveis reais. No entanto, o processo de transferência de calor foi diferente do que ocorre em um elemento real, pois nele, a espiral aqueceu o elemento *dummy*, que aqueceu a água (ou o ar) que estavam no interior do tubo de vidro. Em elementos combustíveis reais, o calor é gerado dentro das placas e, então, transferido radialmente para a água ou o ar. O elemento *dummy* foi instrumentado com sete termopares. Observou-se que, para imersões maiores ou iguais a aproximadamente 20,3% do comprimento ativo das placas combustíveis, ocorreu um mecanismo de transferência de calor muito mais eficiente, quando comparado com outros níveis de imersão. Não foi feita nenhuma comparação com o elemento totalmente descoberto. Nesse trabalho foi utilizada uma seção de testes com possibilidade de variação no nível de descobrimento.

WARINNER et al. (1984) apresentaram uma comparação de duas séries de testes experimentais de perda de refrigerante em elementos combustíveis no *Aerospace Systems Test Reactor* (ASTR), com os resultados calculados pelo programa 3D-AIRLOCA, desenvolvido pelo *Argonne National Laboratory* para simular a perda de refrigerante em reatores de pesquisa. Os testes experimentais foram realizados em 1964 para uma faixa de potência entre 0,39 a 8,87 MW com tempos de irradiação de 300, 1540, 1800 e 10000 segundos. Todos os testes foram efetuados com o descobrimento total dos elementos combustíveis sem obstrução à circulação do ar. Não foram realizados experimentos com descobrimentos parciais. Esses testes representam uma boa fonte de dados para análise de APR em reatores de pesquisa.

O ASTR era um reator especial, desenvolvido dentro de um projeto do governo dos EUA, de aeronaves alimentadas por energia nuclear para fins militares entre os anos de 1946 e 1961. O ASTR utilizava elementos combustíveis do tipo

MTR dentro de um vaso de pressão de aço, que poderia operar com água ou ar (LAWRENCE; PANCOAST, 1966).

O *Swiss Federal Reactor Research Institute* (SFTRI) desenvolveu uma seção de testes para o estudo de experimentos de perda parcial de refrigerante no reator Saphir, de 10 MW (DREIER; WINKLER, 1985). A seção de testes era constituída de quatro placas de alumínio com a mesma geometria das placas dos elementos combustíveis do tipo MTR, aquecidas eletricamente e inseridas em um tanque de água. O perfil axial utilizado foi uniforme, diferentemente de um elemento real. O objetivo era simular o acidente de ruptura dos tubos colimadores (*beam-holes*) do Saphir. Foram simulados três níveis de descobrimento parcial do núcleo: 35%, 58,3% e 91,7%, que correspondem ao nível do comprimento aquecido imerso em água. Para cada nível de água, a potência das placas foi variada e as temperaturas e o vapor gerado foram medidos em condições estacionárias. Para o menor descobrimento (35%), foram verificadas condições muito favoráveis de remoção de calor. No entanto, observou-se que o nível maior de descobrimento (91,7%) era baixo o suficiente para bloquear apenas a circulação do ar nas placas, com condições de remoção de calor bem mais desfavoráveis que nos outros casos.

No reator turco TR-2 de 5 MW, foram realizados três experimentos de perda de refrigerante para diferentes tempos de resfriamento, utilizando um elemento combustível instrumentado com cinco termopares distribuídos ao longo do elemento (SESVIK; YAVUZ, 1998; YILMAZER; YAVUZ, 2004). Nesses experimentos, o elemento instrumentado foi irradiado por quatro dias, retirado do núcleo e colocado em um contêiner blindado com chumbo dentro da piscina. Nos três experimentos, os tempos de permanência do elemento combustível instrumentado dentro do contêiner e da piscina foram de 20h19min, 9h37min e 3h55min. Em seguida, o contêiner com o elemento instrumentado foi retirado da piscina e suspenso no ar, atrás de uma parede de isolamento de concreto pesado. O contêiner possuía ainda um isolamento térmico para o elemento combustível, com espuma de poliuretano colocada entre a estrutura interna de alumínio e o chumbo. O estudo não verificou o descobrimento parcial do elemento.

A *Ben Gurion University* e a *Nuclear Regulatory Commission* de Israel desenvolveram uma seção experimental de testes para simular a imersão parcial de placas aquecidas (AHARON; HOCHBAUM, 2006; AHARON et al., 2008). Essa seção foi composta por duas placas de aço inoxidável, aquecidas eletricamente, e

um tanque de água para simular o descobrimento parcial de elementos combustíveis do tipo MTR. Não foram fornecidas informações quanto ao tipo de perfil axial de potência simulado. Foram simulados vários níveis de imersão e de potência nas placas. Observou-se que ocorreu o efeito da ebulição da parte submersa do elemento aquecido durante o resfriamento das placas.

O *Research Reactor Institute* da Universidade de Quioto, no Japão, realizou um experimento simulando a perda de refrigerante no *Kyoto University Research Reactor* (KUR), que é um reator de 5 MW (ITO; SAITO, 2016). O experimento foi realizado com uma seção de testes que utilizou uma placa com um aquecedor elétrico de fita para simular um elemento combustível real. O perfil da distribuição axial de potência usado neste trabalho foi uniforme. Os experimentos foram apenas na condição de descobrimento total. Foram medidas as temperaturas de entrada e de saída do ar para os estudos de coeficiente de transferência de calor por convecção natural e de temperatura no centro da placa. Segundo a revisão bibliográfica realizada, esse foi um dos últimos trabalhos experimentais de perda de refrigerante em que foi utilizado um elemento com aquecimento elétrico para simular o elemento combustível real.

Com base na revisão bibliográfica, constata-se que os experimentos propostos nesse trabalho com a seção de testes STAR e o ECI apresentam as seguintes características de originalidade:

- ✓ nenhum experimento, até o momento, utilizou o conceito de uma seção de testes dentro da piscina, como a STAR;
- ✓ a STAR permite o esvaziamento e o reenchimento com velocidades controladas e para vários níveis de descobrimentos;
- ✓ um elemento combustível padrão instrumentado (ECI) do IEA-R1 é utilizado com um perfil de distribuição de potência característico de elementos combustíveis, reproduzindo a situação real de resfriamento dos elementos combustíveis do reator IEA-R1 em caso de acidentes de perda de refrigerante;
- ✓ nos experimentos com a STAR, o ECI não necessita ser retirado da piscina, portanto, não é necessário o uso de blindagens adicionais;

- ✓ a própria água da piscina funciona como uma excelente blindagem, garantindo assim que nenhum aumento significativo dos níveis de radiação seja detectado;
- ✓ o ar proveniente da STAR, quando do reenchimento da seção de testes com água, é direcionado para a tubulação do Sistema de Ventilação e Ar Condicionado (SVAC) do reator no saguão da piscina, onde existem medidores de radiação para detectar possíveis gases provenientes de algum dano ao ECI.

Portanto, as razões expostas acima comprovam a originalidade desse trabalho de doutorado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos a fundamentação teórica dos fenômenos envolvidos, o aparato experimental e os experimentos realizados neste trabalho.

3.1 - Fundamentação teórica

Os processos envolvidos nesse trabalho são: a perda de refrigerante primário, o calor de decaimento e os mecanismos de transferência de calor.

3.1.1 - Acidente de perda de refrigerante

O acidente de perda de refrigerante em um reator nuclear pode levar ao descobrimento total ou parcial dos elementos combustíveis que constituem o núcleo do reator. Nesses casos, o reator é imediatamente desligado, mas ainda há a produção de calor residual ou calor de decaimento devido aos produtos de fissão originados das fissões nucleares.

Para retirar o calor residual, a maioria dos reatores nucleares possuem sistemas de resfriamento de emergência para garantir a integridade do núcleo. Alguns desses sistemas podem ser ativos, utilizando bombas, ou totalmente passivos, os quais têm sido utilizados nas novas gerações de reatores nucleares de potência. Os sistemas passivos geralmente são compostos por grandes tanques de água, água que entra no núcleo do reator e o resfria por circulação natural (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2009).

Em reatores de pesquisa, o estudo da fenomenologia da circulação natural é muito importante e é o objeto desse estudo.

Na sequência será apresentada a fundamentação teórica do calor de decaimento.

3.1.2 - Calor de decaimento

Como mencionado anteriormente, mesmo com desligamento de um reator nuclear, como o IEA-R1, ainda há a geração de potência térmica devido aos produtos de fissão que são gerados da fissão nuclear e ficam acumulados dentro do revestimento das placas dos elementos combustíveis dos reatores. Essa potência ou

calor de decaimento é gerada imediatamente após o desligamento do reator e possuindo uma redução exponencial com o tempo.

O cálculo do calor de decaimento depende principalmente da potência de operação e do tempo em que o reator operou a essa potência (EL-WAKIL, 1971).

Para a fissão do U^{235} , o calor de decaimento térmico em um elemento combustível é proporcional às emissões de radiação gama e beta, como indicado nas equações (3.1) e (3.2) (POND; MATOS, 1996):

$$\beta(t_{dd}) = 1,50 \cdot 10^{-6} \cdot t_{dd}^{-2} \quad (3.1)$$

$$\gamma(t_{dd}) = 1,67 \cdot 10^{-6} \cdot t_{dd}^{-2} \quad (3.2)$$

Onde:

β – emissão de radiação beta (MeV/s-f);

γ – emissão de radiação gama (MeV/s-f);

t_{dd} - tempo de decaimento (dias).

Considerando um elemento combustível que foi irradiado por um tempo de operação do reator t_i , tem-se a seguinte expressão atribuída a Way e Wigner, equação (3.3) (POND; MATOS, 1996; ETHERINGTON, 1958).

$$H = 6,22 \cdot 10^{-2} \cdot P_{ot} (t_d^{-0,2} - (t_i + t_d)^{-0,2}) \quad (3.3)$$

Onde:

H - calor de decaimento do reator (W);

P_{ot} - potência de operação do reator (W);

t_i - tempo de irradiação (ou de operação) (s);

t_d - tempo de decaimento (s).

Os resultados obtidos da equação (3.3) geralmente são conservativos (POND; MATOS, 1996). A equação (3.3) foi utilizada neste estudo para os cálculos do calor de decaimento do ECI para cada um dos experimentos de perda de refrigerante simulados nesse trabalho. A partir dessa equação foi construída uma planilha EXCEL® considerando o histórico de operação do reator IEA-R1 com os

respectivos tempos de início e fim e para várias semanas de operação (BELCHIOR, 2016)².

O calor de decaimento em um elemento combustível (EC), como o ECI, é calculado dividindo o calor de decaimento gerado no reator (H) pelo número total de elementos combustíveis e de controle do IEA-R1 (n_{EC}), e multiplicando pelo fator de potência radial médio do ECI (f_r), conforme equação (3.4):

$$H_{ECI} = \frac{H}{n_{EC}} \cdot f_r \quad (3.4)$$

Onde:

H_{ECI} - calor de decaimento gerado no ECI (W);

f_r – fator de potência radial médio;

n_{EC} – número total de elementos combustíveis e de controle (que será mencionado a seguir).

A seguir, são apresentados os principais mecanismos de transferência de calor envolvidos nos experimentos de perda de refrigerante.

3.1.3 - Mecanismos de transferência de calor

Durante a perda de refrigerante total ou parcial em reatores de pesquisa, como o IEA-R1, se não houver obstrução à circulação natural do ar nos canais internos do EC, parte do calor de decaimento gerado no seu interior será dissipado, principalmente, pela condução de calor radial nas placas e pela convecção natural nos canais de resfriamento. Outra parte do calor de decaimento do EC será dissipada por convecção natural nas suas faces externas e por radiação térmica nessas mesmas faces, quando não houver isolamento térmico na parte externa do ECI, que é o caso da seção STAR.

Quando houver obstruções à entrada de ar nas placas do EC, o calor de decaimento será dissipado principalmente por convecção natural pelo ar ou pela água nas faces externas do EC, por meio da condução de calor axial e radial e pela radiação térmica, como no caso do ECI utilizado nesse trabalho.

² Comunicação pessoal, planilha de potência de decaimento versus histórico de operação fornecida por BELCHIOR Jr., A. em 2016.

A equação (3.5) apresenta as principais formas de dissipação do calor de decaimento esperadas para os experimentos de perda de refrigerante:

$$H_{ECI} = H_{ECI_{in}} + H_{ECI_{ex}} + H_{ECI_{RT}} + H_{\gamma} \quad (3.5)$$

Onde:

$H_{ECI_{in}}$ - calor de decaimento do ECI, dissipado por convecção natural nos canais internos do ECI (W);

$H_{ECI_{ex}}$ - calor de decaimento do ECI dissipado por convecção natural nas faces externas do ECI (W);

$H_{ECI_{RT}}$ - calor de decaimento do ECI dissipado por radiação térmica (W);

H_{γ} - calor de decaimento do ECI dissipado por radiação gama (W) (~5% do calor total).

No processo de reenchimento do EC, como no ECI, ocorre a convecção forçada que, em alguns experimentos simulados nesse trabalho, está aliada à ebulição sub-resfriada. A retirada de calor no reenchimento é dada pela equação (3.6):

$$H_{ECI} = H_{ECI_{CF}} + H_{ECI_{Ebulição}} \quad (3.6)$$

Onde:

$H_{ECI_{CF}}$ - calor de decaimento dissipado por convecção forçada (W);

$H_{ECI_{Ebulição}}$ - calor de decaimento dissipado por ebulição (W).

Na Figura 3.1, é apresentada uma ilustração dos perfis de temperatura esperados nas placas e nos canais de resfriamento de um EC, como no ECI, e do escoamento por circulação natural nestes canais, para os experimentos de perda de refrigerante sem obstruções do ar. Como ilustração, são indicadas as temperaturas de meia placa combustível, composta pelo combustível e pelo revestimento, e do canal de resfriamento a ela acoplado. Uma parcela importante do calor de decaimento gerada nas placas é dissipada internamente por meio da condução radial nas placas e da convecção natural nos canais. Observa-se que a geração do calor de decaimento e a condução radial na placa proporcionam a circulação ou convecção natural no EC. A grandeza v representa a velocidade de escoamento por circulação natural na direção y .

Figura 3.1– Perfis de Temperatura esperados nas placas e canais do ECI

Fontes: EL-WAKIL, M., M., 1971; ITO, D.;SAITO, Y, 2016; autor da tese.

O calor de decaimento dissipado internamente nos canais de um EC, como no ECI, é dado pela equação (3.7) (EL-WAKIL, 1971):

$$H_{ECI_{in}} = 2n_{pc}q_{in} = 2n_{pc}2k_{cb}A_p \frac{(T_m - T_s)}{e_c/2} = 2n_{pc}2k_rA_p \frac{(T_s - T_c)}{e_r} = 2n_{pc}h_{in}A(T_c - T_f) \quad (3.7)$$

Onde:

q_{in} – potência de decaimento gerada em meia placa (W);

n_{pc} – número de placas combustíveis do ECI - 18 placas.

k_{cb} – condutividade térmica do combustível (W/m K);

A_p – área da seção transversal da placa (m²);

e_c – espessura do cerne (m);

k_r – condutividade térmica do revestimento de alumínio (W/m K);

e_r – espessura do revestimento (m);

T_m – temperatura no centro do combustível (K);

T_s – temperatura na fronteira entre o combustível e o revestimento (K);

T_c – temperatura do revestimento (K);

h_{in} – coeficiente de transferência de calor por convecção natural interna dos canais (W/m² K);

T_f – temperatura do fluido (K);

e_{cr} – espessura do canal de resfriamento (m).

A condutividade térmica do combustível (U_3Si_2) é de aproximadamente 20 W/m K e a do revestimento de alumínio é de aproximadamente 220 W/m K (MATOS; SNELGROVEL,1990).

O coeficiente de transferência de calor h_{in} por convecção natural interna do ar (sem a presença de ebulição) nas placas pode ser dado pelas equações (3.8) e (3.9) (BARTZIS et al, 1987):

$$h_{in} = 0,59 \frac{k_f}{D_h} (P_r G_r) \quad \text{para } G_r > 10^{10} \quad (3.8)$$

$$h_{in} = 0,10 \frac{k_f}{D_h} (P_r G_r) \quad \text{para } G_r \leq 10^{10} \quad (3.9)$$

Onde:

$$P_r = \mu \frac{c_p}{k_f}; \quad (3.10)$$

$$G_r = \rho^2 g \beta_t (T_c - T_f) \frac{D_h^3}{\mu^2}; \quad (3.11)$$

Onde:

P_r – número de *Prandtl*;

G_r – número *Grashof*;

k_f - condutividade térmica do fluido (ar) (W/m K);

D_h – diâmetro hidráulico (m);

μ – viscosidade dinâmica (N.s/m²);

c_p – calor específico do fluido (ar) (J/kg K);

ρ – densidade do fluido (kg/m³);

g – aceleração da gravidade (m/s²);

β_t – coeficiente de expansão térmica do fluido (ar) (1/ K).

As equações (3.8), (3.9), (3.16) e (3.17) fazem parte do programa THEAP, desenvolvido na Grécia para o cálculo de acidentes de perda de refrigerante total e parcial em reatores de pesquisa.

A convecção ou circulação natural é o regime de troca de calor em que o movimento do fluido é resultado das diferenças de densidade devidas ao aquecimento. As correntes de convecção natural são originadas pelas forças de empuxo que são impostas ao fluido (HOLMAN, 1983).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.12)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (3.13)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2 v - \rho g \quad (3.14)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \nabla^2 T \quad (3.15)$$

Onde:

u – velocidade na direção x (m/s);

v – velocidade na direção y (m/s);

P – pressão (Pa);

α – difusividade térmica (m²/s);

T – temperatura (°C);

O termo $-\rho g$ na equação de momento (3.14) refere-se à força peso por unidade de volume (HOLMAN, 1983).

Para a convecção natural do ar nas faces externas do EC (ECI), o coeficiente de transferência de calor h_{ex} (sem a ocorrência de ebulição) pode ser dado pelas equações (3.16) e (3.17) (BARTZIS et al, 1987).:

$$h_{ex} = 0,51 \frac{k_f}{La} (Pr Gr) \quad \text{para } Gr > 10^{10} \quad (3.16)$$

$$h_{ex} = 0,12 \frac{k_f}{La} (Pr Gr) \quad \text{para } Gr \leq 10^{10} \quad (3.17)$$

Onde:

La – comprimento ativo do ECI.

Na Figura 3.3, é apresentado, como exemplo, o EC imerso em um tanque de água, com descobrimento parcial e obstrução da convecção natural nos canais internos do elemento. Para este caso, é esperada a condução axial e a convecção natural pela água e pelo ar.

A parcela do calor de decaimento do EC (ECI) dissipado por radiação térmica nas faces externas do EC (sem a presença de ebulição) pode ser dada, pela equação (3.18) (HOLMAN, 1983):

$$H_{ECI\ Rad} = \frac{\sigma A_{eECI} (T_{p1}^4 - T_{p2}^4)}{1/\epsilon_{ECI} + (A_{eECI}/A_{cas})(1/\epsilon_{cas} - 1)} \quad (3.18)$$

Onde:

σ – constante de *Stefan-Boltsman* – ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);

A_{eECI} – área externa do ECI (mm^2);

A_{cas} – área interna do casco da seção STAR (mm^2);

ϵ_{ECI} – emissividade do ECI;

ϵ_{cas} – emissividade do casco da STAR;

T_{p1} – temperatura da face externa do ECI ($^{\circ}\text{C}$);

T_{p2} – temperatura da face interna do casco da seção STAR ($^{\circ}\text{C}$).

Figura 3.3 - Convecção natural no ECI - Experimento de perda parcial de refrigerante

Fonte: autor da tese.

No encerramento dos experimentos de descobrimento total e parcial, como na seção STAR (ECI), tem-se o reenchimento da seção, com a presença de convecção forçada da água. Quando a temperatura de saturação no revestimento do EC é atingida, ocorre também a ebulição sub-resfriada (HOLMAN, 1983). Assim, o calor de decaimento do EC retirado pela convecção forçada é dado pela equação (3.19) (HOLMAN, 1983; EL WAKIL, 1971) e pela ebulição sub-resfriada, pela equação (3.20) (HOLMAN, 1983):

$$H_{ECI_{Conv Forçada}} = A_{eECI} 0,019 \frac{k_f}{D_h} (R_e^{0,8} P_r^{0,4}) \quad (3.19)$$

$$H_{ECI_{Ebulição}} = A_{eECI} \left(\frac{c_l \Delta T_x}{h_{lv} P_r^{1/8} C_{sf}} \right)^{3,030303} \mu_l h_{lv} \frac{\sqrt{g(\rho_l - \rho_v)}}{\sqrt{g\tau}} \quad (3.20)$$

Onde:

$$\Delta T_x = T_c - T_{sat} \quad (3.21)$$

ΔT_x – excesso de temperatura (°C)

T_{sat} – temperatura de saturação da água na altura da seção STAR (°C)

c_l – calor específico do líquido saturado (J/kg °C);

$P_{r_{lv}}$ – número de P_r do líquido saturado

C_{sf} – constante determinada a partir de valores experimentais;

μ_l – viscosidade dinâmica do líquido (N.s/m²);

h_{lv} – entalpia de vaporização (J/kg);

ρ_l – densidade do líquido saturado (kg/m³);

ρ_v – densidade do vapor saturado (kg/m³);

τ - tensão superficial da interface liquido-vapor (N/m).

3.2 - Descrição dos experimentos

O aparato experimental utilizado neste trabalho é descrito nessa seção, assim como os experimentos de perda de refrigerante (EPR) que foram realizados com o ECI (EC-208), introduzido na Seção de Testes de Perda de Refrigerante (STAR) nas instalações do reator IEA-R1.

Por ser a base desse estudo, o reator de pesquisas IEA-R1 será descrito detalhadamente a seguir.

3.2.1 - Reator IEA-R1

O reator nuclear de pesquisas IEA-R1 está localizado no IPEN, no campus da Universidade de São Paulo, na cidade de São Paulo, SP (INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2005).

O reator é do tipo piscina, de 5 MW de potência térmica, projetado pela *Babcock & Wilcox Company* e, atualmente, opera à potência de 4,5 MW (INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2005). Até fevereiro de 2015, o reator operava semanalmente em turnos de 64h ininterrupta; atualmente, opera de segunda à quinta-feira em períodos diários de 8h.

Em 16 de setembro de 2017, o IEA-R1 completou sessenta anos de operação, desde a sua primeira criticalidade (INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2017)³. A Figura 3.4 fornece uma vista do saguão da piscina e do núcleo do reator em operação.

Figura 3.4 – Vista do saguão da piscina e do núcleo do reator IEA-R1

Fonte: MARTINS, M. O., 2015; SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, 2012⁴.

As principais utilizações do reator IEA-R1 são: para a produção de radioisótopos para uso na medicina nuclear, aplicações na indústria e na agricultura, na análise por ativação e preparação de traçadores, em testes de materiais e de

³ INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICA E NUCLEARES, página eletrônica, www.ipen.br, Centro do Reator de Pesquisas, 2017.

⁴ SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, página eletrônica, http://www2.uol.com.br/sciam/noticias/reator_nuclear_iea-r1_opera_em_potencia_maxima.html, 2012.

combustíveis nucleares, em experimentos na área de pesquisa e desenvolvimento, no treinamento e formação de operadores de reatores de pesquisa, entre outros (INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2005, 2017⁵).

O IEA-R1 possui um circuito primário responsável pela remoção do calor gerado no núcleo do reator. Conta, também, com uma piscina de água desmineralizada de 272 m³ de volume e uma válvula de convecção que faz o acoplamento do núcleo com a tubulação do circuito primário (INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2005).

O circuito secundário remove o calor do circuito primário e o dissipa para a atmosfera, por meio das torres de resfriamento (INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2005).

Após o desligamento seguro do reator, o calor de decaimento do núcleo é retirado por convecção natural da água da piscina do reator (INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2005).

O IEA-R1 possui um Sistema de Resfriamento de Emergência (SRE), projetado para remover o calor residual do núcleo, em caso de um APR. Esse sistema é constituído de dois circuitos redundantes totalmente passivos. Cada circuito conta com um reservatório de água, que se encontra em um nível mais elevado do que a piscina, que injeta água por gravidade aos seis aspersores que estão localizados sobre o núcleo do reator (TORRES, 1997; MAPRELIAN, 1998; INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2005).

Nas condições atuais do IEA-R1, o APR com o descobrimento total do núcleo, que é caso mais crítico, consiste na ruptura da tubulação do dreno da piscina em um tempo de 176min36. O APR com perda parcial mais crítico seria o rompimento do tubo colimador (*Beam Hole*) BH-3, com a submersão parcial de 32,5% do comprimento ativo dos elementos combustíveis em um tempo de 23min38.

O núcleo do reator é composto por 20 elementos combustíveis padrão (ECP), quatro elementos combustíveis de controle (ECC), refletores de nêutrons, irradiadores e fonte de nêutrons (INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2005). A Figura 3.5 fornece uma representação esquemática do núcleo do IEA-R1, com sua placa matriz, elementos e estruturas de sustentação. A placa matriz é a estrutura onde são posicionados os elementos combustíveis.

⁵ INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICA E NUCLEARES, página eletrônica, www.ipen.br, Centro do Reator de Pesquisas, 2017.

Figura 3.5 - Representação esquemática do núcleo e estruturas do IEA-R1

Fonte: INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2005; autor da tese

Os elementos combustíveis padrão e de controle são responsáveis pela reação nuclear em cadeia controlada e pela geração da potência do núcleo do reator. Os elementos de controle têm, também, a função de controlar a reação nuclear por meio de elementos absorvedores de nêutrons.

Os refletores de nêutrons são colocados para refletir os nêutrons gerados na reação nuclear que tentam escapar do sistema, a fim de reaproveitá-los para novas fissões. Os irradiadores são usados para irradiar os materiais que são utilizados na indústria ou na realização de experimentos. A fonte de nêutrons é utilizada para iniciar a reação em cadeia no núcleo, ou seja, dar a partida ao núcleo do reator.

As principais características dos ECPs do IEA-R1 e o número total de elementos combustíveis do núcleo são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características dos elementos combustíveis do reator IEA-R1

TIPO DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR	
Composição química	U ₃ Si ₂
MATERIAL COMBUSTÍVEL	
País de origem	Brasil
Forma do combustível	Dispersão em Al
Teor de urânio (gU/cm ³)	3,0
Fração em massa de Urânio (%)	59,61 ± 0,02
Enriquecimento (%)	19,75 ± 0,22
PLACA COMBUSTÍVEL	
Massa de urânio (g)	78,71 ± 0,28
Massa de ²³⁵ U (g)	15,54 ± 0,18
Largura ativa (mm)	60,35
Comprimento ativo ⁶ (mm)	590 ± ₀ ²⁰
Material do revestimento	ASTM 1060
Espessura do revestimento (mm)	0,38
Espessura do cerne (mm)	0,76
ELEMENTO COMBUSTÍVEL	
Número de placas combustíveis	18
Massa total de urânio (g)	1416,78 ± 5,04
Massa total de ²³⁵ U (g)	279,72 ± 3,24
Espessura do canal de resfriamento (mm)	2,89
Largura canal resfriamento (mm)	66,90
Diâmetro hidráulico do canal de resfriamento (mm)	5,54
Material da placa suporte	ASTM 6262 T6
Material do bocal	ASTM 6262 T6
Folga média entre elementos (mm)	1
Massa de um elemento (kg)	5,9
NÚCLEO	
Número total de ECP e de ECC (<i>n_{EC}</i>)	24

Fontes: INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2005; UMBEHAUN, P. E., 2016; autor da tese.

Na Figura 3.6, é apresentado um desenho do ECP fabricado no IPEN, que é formado pelo bocal de alumínio, duas placas suporte laterais de alumínio, dezoito placas combustíveis de urânio revestidas com alumínio e pino de sustentação de alumínio para o seu transporte. O bocal permite que o elemento combustível seja posicionado na placa matriz do reator (INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2005).

⁶ Foi admitido nos cálculos deste trabalho o comprimento ativo do ECI de 600 mm.

Figura 3.6 - Elemento combustível padrão - fabricação IPEN/CNEN-SP

Fonte: INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2005, autor da tese.

A Tabela 3.2 apresenta as principais condições termo-hidráulicas limites para os ECPs do IEA-R1. Destaca-se que a condição limitante é da temperatura de empolamento do combustível, de 500°C, condição esta que ocasionará o fechamento do canal de resfriamento impedindo, assim, a refrigeração efetiva do núcleo. A temperatura máxima do combustível nas condições operacionais deve ser menor do que 130°C, pois está relacionada ao aumento da taxa de corrosão no ECP, sendo considerada, assim, como a temperatura limite de segurança, para proteção do ECP.

Tabela 3.2 - Principais condições termo-hidráulicas limitantes para o IEA-R1 em operação

Condição	Limite
Temperatura de mistura do refrigerante	< 100°C
Temperatura média na superfície do revestimento – aumento da taxa de corrosão	< 95°C
Temperatura máxima na superfície do revestimento	< T_{onb}
Velocidade de escoamento no canal de refrigeração	< $V_{crítica}$
Fluxo de calor máximo	< $q_{instabilidade\ escoamento}$
Fluxo de calor máximo	< $q_{fluxo\ crítico\ de\ calor}$
Temperatura máxima no combustível (revestimento ou cerne) para eventos iniciadores postulados - Empolamento	< 500°C
Limite de temperatura máxima do combustível nas condições operacionais	< 130°C

Fontes: PERROTTA, J. A., 1997; INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2005; autor da tese.

Na Figura 3.7 é mostrada uma representação esquemática de dois ECPs posicionados um ao lado do outro. Nesta figura, podem ser vistas as placas combustíveis e os canais de resfriamento dos ECPs. Os canais de resfriamento são aqueles por onde escoam a água do circuito primário para a remoção do calor gerado nas placas combustíveis do ECP. O escoamento pelos canais pode ser descendente, quando da circulação forçada ou ascendente, quando da circulação natural.

A Figura 3.8 ilustra algumas etapas de fabricação do ECP do IPEN. Nesta figura, é possível visualizar a montagem dos briquetes de urânio nas placas de alumínio, a sua soldagem, o aquecimento e a laminação. Também, pode ser vista, de forma separada, uma das 18 placas após a sua laminação e bem como as vistas do bocal, das placas e do conjunto do ECP.

Figura 3.7 - Placas combustíveis e canais de resfriamento dos ECPs do IEA-R1

Fontes: Umbehaun, P. E., 2004; autor da tese.

Figura 3.8 - Ilustração da fabricação dos ECP do IPEN

SALIBA-SILVA, A. M. et al, 2011.

3.2.2 - Descrição do Elemento Combustível Instrumentado (ECI)

O elemento combustível instrumentado foi desenvolvido por pesquisadores do IPEN para operar no reator IEA-R1 e os detalhes de seu projeto, e os resultados experimentais obtidos foram apresentados por UMBEHAUN (2016). O ECI recebeu a designação oficial de EC-208.

O ECI é idêntico a um ECP de U_3Si_2 (3 gU/cm^3). Nele foram instalados quinze termopares do tipo K, para a medição das temperaturas do fluido (TF) e do revestimento (TC). São quatro termopares em cada canal lateral, quatro no canal central e mais um termopar para medida da temperatura do fluido na entrada (TF1) e dois na saída (TF14 e TF15) do ECI. Atualmente, os termopares TF1 e TF15 estão fora de funcionamento, pois apresentaram problemas com seus sinais.

Na Figura 3.9 é apresentado um desenho esquemático do ECI com as respectivas posições dos termopares, sendo o comprimento ativo do ECI de 600 mm.

Figura 3.9 – Representação esquemática do ECI

Fontes: UMBEHAUN, P. E., 2016; autor da tese.

A Tabela 3.3 apresenta as posições dos termopares do ECI.

Tabela 3.3 – Identificação e posição dos termopares do ECI

Posição a partir da Entrada do Canal (mm)	Lado Direito	Centro	Lado Esquerdo	Comprimento Relativo das Placas
	Temperaturas do Revestimento			(%)
252,5	TC2	TC3	TC4	59,7
432,5	TC5	TC6	TC7	30,8
552,5	TC8	TC10	TC12	11,6
	Temperaturas do Fluido			
552,5	TF9	TF11	TF13	11,6
Saída do ECI	TF14 TF15			-

Fontes: UMBEHAUN, P. E., 2016; autor da tese.

Na posição mais elevada do ECI, encontram-se os termopares TC2 na sua lateral direita, TC3 no seu canal central e TC4 na sua lateral esquerda. Essa posição equivale a 59,7% do comprimento total das placas do ECI ou 62,2% do seu comprimento ativo.

Os termopares TC5 (lateral direita), TC6 (canal central) e TC7 (lateral esquerda) estão na posição equivalente a 30,8% do comprimento total e 32,1% do ativo.

Finalmente, os termopares TC8 e TF9 (lateral direita), TC10 e TF11 (canal central) e TC12 e TF13 (lateral esquerda) estão na posição 11,6% do comprimento total e 12,1% do comprimento ativo.

Os termopares são do tipo K, encamisados com aço inoxidável, não aterrados, e possuem as seguintes dimensões 0,5 mm de diâmetro e 10 m de comprimento. Os termopares foram montados por interferência em pastilhas de alumínio 6061 de 10 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, conforme Figura 3.10.

Figura 3.10 – Detalhe da pastilha com os termopares do ECI

Fonte: UMBEHAUN, P. E., 2016.

Na Figura 3.11 é apresentado um detalhe esquemático da montagem dos termopares nas placas do ECI, de onde observamos que eles medem a média entre as temperaturas de duas placas combustíveis, por estarem em contato com as duas.

Figura 3.11 – Detalhe esquemático da montagem dos termopares do ECI

Fontes: UMBEHAUN, P. E., 2016; autor da tese.

Nas Figuras 3.12 a 3.14, são apresentadas as fotos do ECI antes de ser irradiado. Na Figura 3.12 podem ser vistos os detalhes das folgas próximas ao bocal. Essas folgas permitem a passagem de ar pelas placas, quando do seu descobrimento e obstrução parcial.

Figura 3.12 – ECI antes de ser irradiado e detalhe das folgas do bocal

Fontes: UMBEHAUN, P. E., 2016; autor da tese.

Na Figura 3.13, é apresentado um detalhe do tubo flexível do cabo dos termopares.

Figura 3.13 – Detalhe do tubo flexível dos termopares do ECI

Fonte: UMBEHAUN, P. E., 2016.

Na Figura 3.14, podem ser vistos os detalhes do bocal superior do ECI, das placas combustíveis, dos canais de refrigeração e dos cabos dos termopares. Nas placas combustíveis é gerado o calor do ECI na condição de operação ou de decaimento. Os canais de refrigeração são os caminhos por onde passa a água ou o ar para a remoção do calor das placas.

Figura 3.14 – Detalhes do bocal superior do ECI

Fontes: UMBEHAUN, P. E., 2016; autor da tese.

3.2.3 - Seção de testes de perda de refrigerante (STAR)

Para a realização dos experimentos de perda de refrigerante total e parcial do ECI, a seção de testes STAR foi projetada, construída, montada e comissionada (MAPRELIAN et al., 2013). A STAR é constituída por uma base, onde estão instalados o ECI, o casco cilíndrico de aço inox, o Sistema de Ar Comprimido (SAC) e a instrumentação. Os experimentos propostos utilizando a STAR foram feitos totalmente dentro da piscina do reator IEA-R1, sendo que nenhum incidente, acidente ou anormalidade tenham sido registrados. O controle eficaz do esvaziamento e do reenchimento da seção com a própria água da piscina permitiu a realização dos experimentos em vários níveis de descobrimento do ECI.

Cada uma das partes que constituem a STAR será descrita a seguir; no entanto, informações complementares da seção poderão ser vistas no APÊNDICE A.

A) Base da STAR

A base da STAR é constituída por dois paletes de alumínio, dois suportes de alumínio, chapas de alumínio e de aço inoxidável, parafusos, porcas e arruelas de aço inoxidável, quatro olhais de içamento, contrapeso de chumbo e aço envolto em caixa de alumínio, dois vergalhões quadrados de alumínio, o bocal de alumínio e cordas de *nylon*, conforme Figura 3.15. As cordas de *nylon* são presas nos olhais para o içamento e movimentação da base.

Dois fusos roscados de aço inox M20 são presos na base para fazer o acoplamento e o fechamento com o casco cilíndrico por meio das porcas especiais de fechamento M20.

O contrapeso de chumbo e os vergalhões de alumínio são utilizados para compensar a força de empuxo na seção, quando de seu esvaziamento. O bloco de chumbo e aço carbono foi utilizado primeiramente por COELHO (1993). Ele recebeu uma dupla proteção para o contato com a água, pintura e uma caixa envoltória de alumínio.

Figura 3.15 - Base da STAR

Fontes: PRADO, A. C., 2013⁷; autor da tese.

O bocal de alumínio para o posicionamento do ECI é fixado na base pelos suportes de alumínio, parafusos e chapas. As faces dos suportes do bocal contam com isolamento térmico de Celeron®.

A base da STAR tem aproximadamente 527 kg.

Na Figura 3.16, é apresentada a base com um elemento *dummy* (com placas que não têm combustível nuclear) posicionado no bocal de alumínio, a fim de ilustrar a colocação do ECI na STAR. Durante os experimentos simulados neste trabalho, o ECI foi retirado do núcleo e posicionado no bocal de alumínio.

Uma calha de alumínio na parte superior da base permite a acomodação do cabo dos termopares do ECI na base.

⁷ Comunicação Pessoal, fotos da seção de testes STAR fornecidas por PRADO, A. C. em novembro de 2013.

Figura 3.16 - Base da STAR com elemento *dummy*

Fontes: PRADO, A. C., 2013⁸; autor da tese.

Mais informações com relação à base da STAR, incluindo o cálculo do esforço nos olhais da base, são fornecidas no APÊNDICE A1.

B) Casco cilíndrico da STAR

O casco da STAR é cilíndrico, de aço inoxidável e do tipo sino, conforme Figura 3.17. O diâmetro e a altura da parte interna do casco são de 600 mm e 1598 mm, respectivamente, com um volume interno de aproximadamente 0,45 m³.

⁸ Comunicação Pessoal, fotos da seção de testes STAR fornecidas por PRADO, A. C. em novembro de 2013.

A espessura da chapa de aço do casco é de 2 mm. O casco tem aproximadamente 70 kg. Mais detalhes do casco podem ser vistos no APÊNDICE A2.

Figura 3.17 - Detalhe do casco, sua montagem sobre a base, detalhes do rasgo e da porca

Fontes: PRADO, A. C., 2013⁹; autor da tese.

O acoplamento do casco com os fusos (M20) da base é feito por meio dos rasgos de fechamento da sua parte inferior e pelo seu fechamento pelas porcas especiais de fechamento M20. As porcas especiais de fechamento são rosqueadas no fuso M20 por meio de uma ferramenta especial operada de fora da piscina do reator. Na parte inferior, o casco possui também o rasgo para a passagem dos cabos dos termopares do ECI.

A fim de permitir a dissipação de calor do metal para a água, não foi feito um isolamento térmico entre o casco e a piscina.

O casco tem uma travessa na sua tampa superior, que permite seu transporte e acoplamento com a base, por meio de cordas de *nylon*[®]. Possui também conexões para os tubos de ar comprimido por onde são feitos o esvaziamento e o reenchimento da seção.

⁹ Comunicação Pessoal, fotos da seção de testes STAR fornecidas por PRADO, A. C. em novembro de 2013.

Para os experimentos de perda de refrigerante, inicialmente o ECI foi colocado na base e, em seguida, o casco foi acoplado e fixado na base.

No APÊNDICE A3, são fornecidos os cálculos da força de empuxo na seção STAR quando do seu esvaziamento.

C) Sistema de Ar Comprimado (SAC) e instrumentação

O Sistema de Ar Comprimado (SAC) é responsável pelo esvaziamento e reenchimento de água do experimento STAR. Na Figura 3.18, é apresentado um fluxograma simplificado do SAC.

Figura 3.18 - Fluxograma do Sistema de Ar Comprimado da STAR

Fonte: autor da tese.

O SAC recebe o ar do sistema de ar comprimido do reator. A saída do ar da seção de testes é enviada diretamente ao duto do Sistema de Ventilação e Ar Condicionado (SVAC) do reator. O SVAC possui detectores de radiação para acusar possíveis gases radioativos. Durante todos os experimentos realizados na STAR, não foi registrada qualquer anormalidade nos níveis de radiação nos dutos do SVAC.

O SAC é composto de válvulas, mangueiras, conexões e expansores. Para o encerramento seguro dos experimentos é necessário o fechamento da entrada do ar comprimido e a abertura da saída do ar.

Para o fechamento do ar comprimido do SAC, existem duas válvulas redundantes, a VA-1 (válvula de inox de 1/2" do tipo gaveta) com a VA-2 (válvula de latão de 1/4" do tipo agulha) ou a VA-1 com a VA-3 (válvula de latão de 1/4" do tipo agulha), além da válvula do próprio Sistema de Ar Comprimido do Reator, sendo necessário apenas o fechamento de uma delas.

Para a retirada do ar comprimido da seção, o sistema possui três válvulas redundantes em paralelo, a VA-5 (válvula de latão de 1/4" do tipo agulha), a VA-6 (válvula de inox de 1" do tipo gaveta) e a VA-4 (válvula de latão de 1/4" do tipo agulha), sendo necessária apenas a abertura de uma delas.

Todos os experimentos foram realizados com o esvaziamento e o reenchimento da STAR, sem o registro de qualquer falha nas válvulas ou em outro componente do SAC.

Os expansores de PVC têm a função de diminuir a velocidade do ar e impedir o retorno de água pela linha.

Além dos quinze termopares do ECI, a STAR conta com mais quatro termopares adicionais do tipo K para medição da temperatura do ar ou da água: o TF1n, o TF16, o TF17 e o TF18. Esses termopares apresentaram problemas nas conexões e no funcionamento; portanto, não serão apresentados nesse trabalho.

A medida do nível de água na seção é feita por meio de um medidor de nível do tipo pressão diferencial *Validyne*, modelo DP15, a partir da superfície da piscina. Um medidor desse modelo é ilustrado na Figura 3.19.

Figura 3.19 - Medidor *Validyne* modelo DP15

Fonte: VALIDYNE, 2017.

Existe, ainda, um manômetro no SAC para a indicação visual da pressão.

Os sinais de temperatura e nível são enviados para o Sistema de Aquisição de Dados (SAD) do IEA-R1, que foi modificado para receber e registrar esses valores em uma tela específica, especialmente desenvolvida para a realização dos experimentos propostos nesse trabalho. Na Figura 3.20, é apresentada a tela do SAD com o painel preparado para os experimentos com a STAR. A Figura 3.21 é uma foto da sala de controle do IEA-R1, que mostra o *rack* e as telas do SAD, onde foram registrados os dados experimentais obtidos nesse trabalho.

Na tela do SAD são fornecidas as temperaturas dos termopares distribuídos ao longo do ECI, as quatro temperaturas adicionais da STAR (que foram desconsideradas neste trabalho), o nível da piscina e o nível da seção STAR. O nível da seção STAR é o resultado da diferença entre o nível da piscina e o nível medido pelo medidor *Validyne*. O nível da piscina é um parâmetro já medido e registrado pelo SAD.

Figura 3.20 - Tela do SAD do IEA-R1 com painel da seção STAR

Fonte: autor da tese.

Figura 3.21 - Sala de controle do IEA-R1 com o SAD

Fonte: autor da tese.

As incertezas esperadas nas medidas das temperaturas do ECI e nos níveis da piscina e o medidor Validyne estão descritos no APÊNDICE B. No ANEXO 1 são fornecidos os testes de calibração dos instrumentos e dos canais do SAD que foram utilizados pelos termopares do ECI e do nível da piscina do IEA-R1. Os testes de calibração foram feitos pela empresa CONTEMP em outubro de 2016 (CONTEMP, 2016).

D) Montagem e comissionamento

A STAR foi colocada dentro da piscina do IEA-R1 sobre a plataforma de concreto revestida de aço inox que fica sobre a coluna térmica, conforme Figura 3.22. Entre o topo da STAR e a superfície da piscina existe uma coluna de água de aproximadamente 3725 mm. Essa altura se mostrou suficiente para manter a blindagem da seção durante todos os experimentos realizados.

Figura 3.22 - Localização aproximada STAR na piscina do reator IEA-R1

Fontes: INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICA E NUCLEARES, 2005; autor da tese.

Na Figura 3.23, são mostrados os valores aproximados das cotas da piscina do IEA-R1 e da STAR.

Figura 3.23 - Cotas da STAR na piscina do reator IEA-R1

Fontes: INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICA E NUCLEARES, 2005; autor da tese.

Na Figura 3.24, é ilustrada a sequência da montagem da base da STAR no reator IEA-R1. Na Figura 3.25, a sequência da montagem do casco da STAR durante o seu teste de comissionamento pode ser vista. Esse teste foi realizado com o próprio ECI antes de ser novamente irradiado no núcleo. O ECI foi encaixado no bocal da base e, em seguida, o casco foi fixado na base, dentro da piscina do reator IEA-R1. O teste consistiu de dois níveis de descobrimento do ECI, um para o esvaziamento total e outro, parcial.

Figura 3.24 - Instalação da base da seção STAR na piscina do reator IEA-R1

Fonte: autor da tese.

Figura 3.25 - Teste de Comissionamento da STAR na piscina do reator IEA-R1

Fontes: BELCHIOR Jr., A., 2016¹⁰; autor da tese.

3.2.4 - Configuração e operação dos experimentos

Nessa seção, são apresentados: a distribuição de potência do núcleo do reator IEA-R1, os tempos de operação do reator e de decaimento utilizados para a realização dos experimentos de perda de refrigerante.

O ECI foi reintroduzido no núcleo quando da sua mudança de configuração, ocorrida de 2 a 6 de maio de 2016, para a realização dos

¹⁰ Comunicação pessoal, fotos da seção de testes STAR fornecidas por BELCHIOR Jr., A. em fevereiro de 2016.

experimentos com a STAR. Essa configuração do núcleo do IEA-R1 é a de número 257, conforme Figura 3.26. O ECI-208i aparece destacado na Figura 3.26 na cor rosa, na linha 7 e coluna 7 (RODRIGUES, 2016).

Figura 3.26 – Configuração do núcleo do Reator IEA-R1 com o ECI

As distribuições de potência axial e radial do ECI foram obtidas segundo RODRIGUES ¹¹, por meio da simulação com o código CITATION (FLOWLER, 1971) e são encontrados nas Tabelas 3.4 e 3.5, respectivamente. A distribuição de potência axial do ECI foi obtida pela multiplicação da distribuição média do núcleo pelo fator radial médio do ECI. A Tabela 3.4 também fornece as variações percentuais dos fatores axiais entre as posições dos termopares TC3 e TC6; TC3 e

¹¹ Comunicação pessoal, cálculos no Código CITATION fornecidos por RODRIGUES, V. G. em 2017.

TC10. Na Tabela 3.5 são fornecidas, também, as variações percentuais entre as placas laterais e as dezesseis placas centrais. Na Figura 3.27 são apresentadas as distribuições axiais médias da potência normalizada no ECI, do canal central e dos canais laterais à direita e à esquerda do ECI.

Tabela 3.4 – Distribuição de potência axial normalizada no ECI

Comprimento Ativo (mm)	Fator Axial	Termopares do ECI	Variação percentual dos Fatores Axiais (%)	
600	0,550			
580	0,585			
560	0,656			
541	0,735			
521	0,814			
501	0,890			
481	0,960			
461	1,022			
441	1,079			
422	1,128			
402	1,170			
382	1,203	TC2/TC3/TC4		
362	1,227	Maiores Valores		
342	1,244			
322	1,253			
302	1,253			
283	1,245			
263	1,228			
243	1,204			
223	1,173			
202	1,133	TC5/TC6/TC7	TC3 e TC6	6
182	1,086			
162	1,031			
142	0,971			
121	0,903			
101	0,831			
81	0,758	TC8/TC10/TC12	TC3 e TC10	59
61	0,686			
40	0,636			
20	0,652			

Fontes: RODRIGUES, V. G., 2017¹²; autor da tese.

¹² Comunicação pessoal, cálculos no Código CITATION fornecidos por RODRIGUES, V. G. em 2017.

Tabela 3.5 – Distribuição de potência radial normalizada no ECI

Fatores Radiais		
Placa Lateral Direita Termopares TC2, TC5, TC8	16 Placas Centrais Termopares TC3, TC6, TC10	Placa Lateral Esquerda Termopares TC4, TC7, TC12
1,219	0,948	1,177
Variação percentual dos Fatores Radiais		
Lateral Direita e Centrais		Lateral Esquerda e Centrais
(%)		(%)
28,6		24,2
Fator Radial Médio do ECI		
Fator Radial Médio do ECI		0,976

Fontes: RODRIGUES, V. G, 2017¹³; autor da tese.

Figura 3.27 – Distribuição de potência axial normalizada no ECI

Fontes: Autor da tese; RODRIGUES, V. G, 2017¹³.

Como já mencionado, as curvas de calor de decaimento para cada um dos experimentos de perda de refrigerante foram feitas por meio de uma planilha eletrônica que utiliza a equação (3.3) (BELCHIOR, 2016)¹⁴. Foram introduzidas

¹³ Comunicação pessoal, cálculos no Código CITATION fornecidos por RODRIGUES, V. G. em 2017.

¹⁴ Comunicação pessoal, planilha de potência de decaimento versus histórico de operação fornecida por BELCHIOR Jr., A. em 2016.

nessa planilha as condições de operação do reator desde a reintrodução do ECI no núcleo até o fim dos experimentos. Os resultados obtidos são apresentados no próximo capítulo deste trabalho.

Por meio dos cálculos realizados pela planilha eletrônica, foi possível estimar os tempos de decaimento necessários para o início de cada experimento.

No cálculo do calor de decaimento no ECI, equação (3.4), o valor de H deve ser dividido pelo número de elementos combustíveis, que são 24, e multiplicado pelo fator radial, cujo valor é 0,976.

Para esse trabalho, o reator IEA-R1 operou em 4,5 MW, por um período de 2h15min todas as sextas-feiras, excepcionalmente, entre 7h e 9h15, para atender à demanda do calor de decaimento necessária para a realização dos experimentos de perda de refrigerante no ECI. Após esse período de operação, o ECI foi retirado do núcleo do IEA-R1, colocado dentro da seção STAR até o início dos experimentos, durante um período pré-estabelecido para o seu decaimento.

Para o início dos experimentos, foram utilizados dois tempos de decaimento: o primeiro para $t_1 \cong 1\text{h}20\text{min}$ e o segundo para $t_2 \cong 3\text{h}20\text{min}$. Estes tempos de decaimento consideraram os intervalos de tempo entre o desligamento do reator e o início dos dois experimentos.

3.2.5 - Experimentos de perda de refrigerante com a STAR

O objetivo dos experimentos é analisar e comparar os cinco níveis de descobrimento do ECI para duas condições distintas de calor de decaimento. Os cinco níveis envolvem o descobrimento total e mais quatro níveis de descobrimentos parciais do ECI.

Os experimentos têm a finalidade de simular acidentes reais de perda de refrigerante em reatores de pesquisa. Essas simulações demonstram a originalidade do trabalho pelo fato de utilizar um ECI, que é um elemento combustível real, com dimensões, distribuições reais de potência e de calor de decaimento. Deve-se ressaltar que existem limitações nos experimentos realizados, como:

- ausência de um isolamento nas laterais do ECI para limitar a troca de calor por convecção e radiação, que representaria uma condição mais real do núcleo do reator;

- impossibilidade de se obter as condições de calor de decaimento maiores e mais próximas dos acidentes reais, por motivos de segurança da instalação e do ECI.

Para a realização desses experimentos de perda de refrigerante no reator IEA-R1, esse trabalho foi submetido à avaliação e aprovação dos Comitês Interno de Segurança do Reator e de Análise de Segurança (CASI) do IPEN (INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICA E NUCLEARES, 2016, 2016a, 2016b). Como já mencionado na Tabela 3.2, foi adotada uma temperatura limite de segurança de 130°C como a máxima temperatura permitida no ECI, para todos os experimentos de perda de refrigerante realizados nesse trabalho, como proteção para o elemento combustível instrumentado.

Em todos os experimentos, foram consideradas duas condições de observação:

- o transiente total, que é compreendido pelo transiente de esvaziamento da seção, a condição estacionária de nível constante e o transiente de reenchimento da seção;
- a condição estacionária de nível constante, que compreende os níveis de descobrimento específicos para cada experimento.

Para uma melhor visualização e compreensão destas duas condições de observação, é apresentada, na Figura 3.28, uma ilustração de um experimento dividido em quatro pontos:

- A – Início do transiente ou início do esvaziamento da seção;
- B – Início da condição estacionária de nível constante;
- C – Fim da condição estacionária de nível constante ou início do reenchimento da seção;
- D – Fim do transiente ou fim do reenchimento.

Assim, o transiente total é compreendido entre os pontos A e D e a condição estacionária de nível constante, pelo intervalo entre os pontos B e C.

Figura 3.28 - Ilustração do nível e das condições de observação de um EPR

Fonte: autor da tese.

Nos experimentos foram utilizados dois tempos de decaimento previamente mencionados, $t_1 \cong 1\text{h}20\text{min}$ e $t_2 \cong 3\text{h}20\text{min}$, que correspondem a duas condições distintas de calor de decaimento. A primeira, com valores maiores de calor de decaimento e a segunda, com valores menores. Dessa forma, os experimentos foram divididos em dois grupos de cinco níveis de descobrimento. No grupo 1, estão os cinco experimentos de maior calor de decaimento (ou menor tempo de decaimento t_1) e no grupo 2, os outros cinco com menor calor de decaimento (ou maior tempo de decaimento t_2). Esses tempos de decaimento são relativos ao início dos transientes.

Para o início da condição estacionária de nível constante, os tempos de decaimento são denominados t_{1e} e t_{2e} , com valores de $t_{1e} \cong 1\text{h}30\text{min}$ e $t_{2e} \cong 3\text{h}30\text{min}$.

No APÊNDICE C, são apresentadas as fotos da filmagem realizada durante os experimentos do dia 16 de setembro de 2016 pela equipe do Centro do Reator de Pesquisas (CRPq) (SOUZA, 2016)¹⁵ e mais uma foto tirada por BELCHIOR (2016)¹⁶.

Os dez experimentos realizados neste trabalho serão descritos a seguir.

¹⁵ Comunicação pessoal, filmagem do experimento de perda de refrigerante do dia 16 de setembro de 2016, fornecida por SOUZA, S. P., em setembro de 2016.

¹⁶ Comunicação pessoal, foto do experimento de perda de refrigerante do dia 16 de setembro, fornecida por BELCHIOR Jr., A., em setembro de 2016.

A) Experimentos I e II: descobrimento total do ECI (TOT-1e TOT-2)

Os experimentos I (TOT-1) e II (TOT-2) correspondem ao descobrimento total do ECI até um nível de água de aproximadamente 3750 mm, nível esse muito próximo do esvaziamento total da secção STAR, que é de aproximadamente 3730 mm.

Na Figura 3.29, são apresentados os níveis de água dos dez experimentos propostos na secção STAR.

Figura 3.29 - Níveis dos dez EPRs da STAR

Fonte: autor da tese.

Uma ilustração dos níveis dos experimentos TOT-1 e TOT-2 é apresentada na Figura 3.30. O TOT-1 foi programado para um tempo de decaimento t_1 , e TOT-2 para o tempo de decaimento t_2 .

Figura 3.30 - Ilustração dos experimentos 1 e 2 - TOT-1 e TOT-2

Fonte: autor da tese.

O horário de início e término da operação do reator, bem como o seu tempo total de operação e a potência média nesse período são fornecidos na Tabela 3.6. Adicionalmente, são fornecidos os horários de início do esvaziamento da seção, início da condição estacionária de nível constante, com os respectivos tempos de decaimento e o tempo de duração dos experimentos TOT-1 e TOT-2.

Tabela 3.6 - Descrição dos tempos dos experimentos TOT-1 e TOT-2

Operação do Reator							
Início	7h4min	Fim	9h19min	Duração	2h15min	Potência	4,37 MW
Experimentos					TOT-1	TOT-2	
Início do transiente (esvaziamento total) (horário)					10h37min20	12h38min10	
Tempo de decaimento – t_1 e t_2					1h18min20	3h19min10	
Início da condição estacionária de nível constante (horário)					10h51min	12h50min	
Tempo de decaimento – t_{1e} e t_{2e}					1h32min	3h31min	
Tempo do transiente total					1h47min50	2h0min50	
Tempo na condição estacionária de nível constante					1h18min12	1h33min	

Fonte: autor da tese.

A equação (3.5) mostra as principais formas de dissipação do calor de decaimento esperadas para esses experimentos.

Nos experimentos TOT-1 e TOT-2, é prevista a convecção natural do ar nas placas internas do ECI, conforme a Figura 3.2, sem nenhuma obstrução, como principal mecanismo para a remoção do calor de decaimento. Também, é esperada a transferência de calor por radiação térmica e por convecção natural nas faces externas do ECI. É importante mencionar ainda que o processo de transferência de calor está associado à condução de calor radial e axial no ECI.

B) Experimentos III e IV: descobrimento parcial no 1º nível (PA-1 e PA-2)

Nos experimentos III (PA-1) e IV (PA-2) ocorre o descobrimento do ECI até o primeiro nível de esvaziamento parcial de 3910 mm. Esse nível corresponde à altura da metade do bocal de alumínio da STAR.

Os experimentos PA-1 e PA-2 estão ilustrados na Figura 3.31.

O experimento PA-1 foi programado para um tempo de decaimento t_1 , enquanto que o PA-2 para um tempo t_2 . Esses tempos de decaimento foram programados para que o PA-1 tenha condições de calor de decaimento semelhantes ao TOT-1 e o PA-2 ao TOT-2.

Figura 3.31 - Ilustração dos experimentos PA-1 e PA-2

Fonte: autor da tese.

Os tempos correspondentes aos experimentos PA-1 e PA-2, e os respectivos tempos de decaimento t_1 , t_2 , t_{1e} e t_{2e} , são descritos na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Descrição dos tempos dos experimentos PA-1 e PA-2

Operação do Reator							
Início	7h57min	Fim	10h12min	Duração	2h15min	Potência	4,4 MW
Experimentos					PA-1	PA-2	
Início do transiente (esvaziamento parcial) (horário)					11h32min	13h34min15	
Tempo de decaimento – t_1 e t_2					1h20min	3h22min15	
Início da condição estacionária de nível constante (horário)					11h42min45	13h45min30	
Tempo de decaimento – t_{1e} e t_{2e}					1h30min45	3h33min30	
Tempo total do transiente parcial					1h45min	1h58min15	
Tempo na condição estacionária de nível constante					1h19min45	1h42min30	

Fonte: autor da tese.

Na Figura 3.32 é apresentada, de forma ilustrativa, a convecção natural nas placas internas e nas faces externas do ECI para os experimentos PA-1 e PA-2.

Figura 3.32 - Convecção natural no ECI – Experimentos PA-1 e PA-2

Fonte: autor da tese.

Como pode ser observado na Figura 3.32, é esperada a obstrução à convecção natural do ar pelo bocal de entrada do ECI, bem como a circulação natural nas placas internas por meio das folgas existentes entre o bocal e as placas do ECI, conforme Figura 3.12. O nível das folgas é de aproximadamente 4000 mm. Ademais, a transferência de calor por meio da convecção natural e por radiação térmica nas faces externas do ECI é esperada. Também é esperada a condução de calor radial e axial no ECI.

C) Experimento V e VI: descobrimento parcial no 2º nível (PB-1 e PB-2)

Nos experimentos V (PB-1) e VI (PB-2), tem-se o descobrimento parcial do ECI em um segundo nível com um valor aproximado de 4020 mm. Esse nível corresponde a uma altura próxima de 15 mm abaixo do início das placas do ECI. Esse nível está muito perto do nível das folgas do ECI. Esses dois experimentos podem ser visualizados na Figura 3.33.

Figura 3.33 - Ilustração dos experimentos PB-1 e PB-2

Fonte: autor da tese.

O PB-1 tem condições semelhantes de tempo e calor de decaimento aos dos TOT-1 e PA-1; e o PB-2, aos dos TOT-2 e PA-2.

Na Tabela 3.8, são apresentados os tempos em que ocorreram os experimentos PB-1 e PB-2 e os tempos de decaimento t_1 , t_{1e} , t_2 e t_{2e} .

Tabela 3.8 - Descrição dos tempos dos experimentos PB-1 e PB-2

Operação do Reator							
Início	7h02min	Fim	9h17min	Duração	02h15min	Potência	4,43MW
Experimentos				PB-1	PB-2		
Início do transiente (esvaziamento) (horário)				10h45min21	12h58min35		
Tempo de decaimento – t_1 e t_2				1h28min21	3h41min35		
Início da condição estacionária de nível constante (horário)				10h54min51	13h8min40		
Tempo de decaimento – t_{1e} e t_{2e}				1h37min51	3h51min40		
Tempo total do transiente parcial				1h46min18	2h13min38		
Tempo na condição estacionária de nível constante				1h19min45	1h34min10		

Fonte: autor da tese.

Na Figura 3.34, a convecção natural interna e externa esperada para estes experimentos é demonstrada de forma ilustrativa.

Figura 3.34 - Convecção natural no ECI – Experimentos PB-1 e PB-2

Fonte: autor da tese.

Observa-se que como os níveis dos experimentos PB-1 e PB-2 são muito próximos ao nível das folgas, pode ocorrer, ainda, a convecção natural nas placas internas, semelhantemente a dos experimentos PA-1 e PA-2. Espera-se que ocorra a transferência de calor por convecção natural pelo ar nas faces externas do ECI, por radiação térmica e, também, que haja uma pequena troca de calor por convecção natural com a água. A condução de calor radial e axial no ECI também é esperada.

D) Experimentos VII e VIII: descobrimento parcial no 3º nível (PC1 e PC-2)

Os experimentos VII (PC-1) e VIII (PC-2) correspondem ao terceiro nível de descobrimento parcial do ECI, com um valor aproximado de 4074 mm. Esse nível corresponde a uma altura de 38 mm acima do início das placas do ECI, ou seja, 4% do seu comprimento ativo. Esses dois experimentos são ilustrados na Figura 3.35.

Figura 3.35 - Ilustração dos experimentos PC-1 e PC-2

Fonte: autor da tese.

Na Tabela 3.9, são apresentados os tempos relativos aos dois experimentos e os seus tempos de decaimento t_1 , t_{1e} , t_2 e t_{2e} .

É importante observar que houve um atraso para o início do PC-1 e PC-2, com tempos de decaimento t_1 , t_{1e} , t_2 e t_{2e} , que foram maiores que todos os outros experimentos. Os atrasos verificados para o início da transiente foram da ordem de 27min40 para o PC-1 e de 27min50 para o PC-2. Para o início da condição estacionária, os atrasos foram de aproximadamente 23min50 para o PC-1 e de 26min para o PC-2. As consequências desses atrasos refletem nas curvas de decaimento para esses experimentos, que serão apresentadas no próximo capítulo.

Tabela 3.9 - Descrição dos tempos dos experimentos PC-1 e PC-2

Operação do Reator							
Início	7h33min	Fim	9h49min	Duração	02h16min	Potência	4,48MW
Experimentos				PC-1		PC-2	
Início do transiente (esvaziamento) (horário)				11h31min36		13h16min46	
Tempo de decaimento – t_1 e t_2				1h42min36		3h27min46	
Início da condição estacionária de nível constante (horário)				11h40min12		13h24min57	
Tempo de decaimento – t_{1e} e t_{2e}				1h52min12		3h35min57	
Tempo total do transiente parcial				1h44min48		1h58min30	
Tempo na condição estacionária de nível constante				1h20min56		1h21min11	

Fonte: autor da tese.

A Figura 3.36 ilustra a convecção natural externa no ECI prevista para estes dois experimentos.

Observa-se, pela Figura 3.36 e equação (3.5), que o calor dissipado por convecção natural nos canais internos do ECI foi anulado pela obstrução do bocal e das folgas do ECI. Essa obstrução foi compensada pela maior remoção do calor das faces externas do ECI pela convecção natural com a água. Há, também, a transferência de calor por convecção natural nas faces externas do ECI com o ar e por radiação térmica. É aguardada ainda a condução radial e axial no ECI.

Figura 3.37 - Ilustração dos experimentos PD-1 e PD-2

Fonte: autor da tese.

Na Tabela 3.10, são apresentados os tempos para os experimentos PD-1 e PD-2 e os respectivos tempos de decaimento t_1 , t_{1e} , t_2 e t_{2e} .

Tabela 3.10 - Descrição dos tempos dos experimentos PD-1 e PD-2

Operação do Reator							
Início	7h3min	Fim	9h18min	Duração	02h15min	Potência	4,5 MW
Experimentos					PD-1	PD-2	
Início do transiente (esvaziamento) (horário)					10h44min25	12h51min11	
Tempo de decaimento – t_1 e t_2					1h27min25	3h34min11	
Início da condição estacionária de nível constante (horário)					10h51min58	12h59min45	
Tempo de decaimento – t_{1e} e t_{2e}					1h34min58	3h42min45	
Tempo total do transiente parcial					1h41min57	2h0min13	
Tempo na condição estacionária de nível constante					0h54min44	1h8min30	

Fonte: autor da tese.

A convecção natural esperada para os experimentos PD-1 e PD-2 pode ser observada na Figura 3.3. Os mecanismos de transferência de calor nesses experimentos são semelhantes aos experimentos PC-1 e PC-2, sendo esperada uma remoção de calor ainda maior pela convecção natural com a água no PD-1 e no PD-2 devido ao seu maior nível de cobertura. O processo de transferência de calor também está ligado à condução de calor radial e axial no ECI.

No APÊNDICE C, são apresentadas as fotos da filmagem dos experimentos PD-1 e PD- realizada pela equipe do CRPq (SOUZA, 2016)¹⁷e também uma foto tirada por BELCHIOR (2016)¹⁸ de fora da piscina.

¹⁷ Comunicação pessoal, filmagem do experimento de perda de refrigerante do dia 16 de setembro de 2016, fornecida por SOUZA, S. P., em setembro de 2016.

¹⁸ Comunicação pessoal, foto do experimento de perda de refrigerante do dia 16 de setembro, fornecida por BELCHIOR Jr., A., em setembro de 2016.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, analisados e comparados os resultados obtidos para os dez experimentos de perda de refrigerante propostos nesse trabalho, utilizando a seção de testes STAR. Foi realizada, também, uma comparação teórica com o código RELAP5 (IDAHO NATIONAL ENGINEERING LABORATORY, 1999) e experimental para dois dos experimentos, com base nas informações fornecidas no ANEXO 2¹⁹.

4.1 - Comparação dos cinco níveis de descobrimento dos experimentos

Os resultados obtidos de todos os experimentos propostos nesse trabalho, para os cinco diferentes níveis de descobrimento nas duas condições de potência de decaimento, grupos 1 e 2, serão apresentados a seguir.

Os esvaziamentos totais para o grupo 1 (TOT-1) e para o grupo 2 (TOT-2) foram considerados como experimentos de referência em cada um dos dois grupos.

As evoluções temporais de calor de decaimento para os cinco experimentos de perda de refrigerante do grupo 1, de maior calor de decaimento, na condição de transiente total e na condição estacionária (quando o nível permanece constante), podem ser vistas nas Figuras 4.1 e 4.2. Nessas figuras é possível identificar os quatro pontos de observação definidos no capítulo anterior (Figura 3.27).

As curvas de calor de decaimento para cada um dos cinco experimentos do grupo 2, nas condições estacionária e de transiente total, são apresentadas nas Figuras 4.3 e 4.4. Nesse grupo, observa-se que os cinco experimentos são os de menor calor de decaimento.

Na Tabela 4.1, são apresentadas as variações percentuais entre os calores de decaimento dos quatro experimentos de perda de refrigerante com descobrimento parcial e um de descobrimento total, para o grupo 1 nas duas

¹⁹ Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDIJIAN, G. em 2017.

condições mencionadas anteriormente. Os mesmos resultados para os experimentos do grupo 2, são apresentados na Tabela 4.2.

Figura 4.1 – Calor de decaimento dos experimentos do grupo 1 - Transiente total

Fonte: autor da tese.

Figura 4.2 – Calor de decaimento dos experimentos do grupo 1 – Condição estacionária

Fonte: autor da tese.

Figura 4.3 – Calor de decaimento dos experimentos do grupo 2 - Transiente total

Fonte: autor da tese.

Figura 4.4 - Calor de decaimento dos experimentos do grupo 2 - Condição estacionária

Fonte: autor da tese.

Tabela 4.1 – Variação percentual do calor do decaimento - EPRs do grupo 1

Variação Percentual Grupo 1			
		Estacionária	Transiente
		(%)	(%)
PA-1 e TOT-1	$((PA-1) - (TOT-1))/(TOT-1)$	1,24	0,06
PB-1 e TOT-1	$((PB-1) - (TOT-1))/(TOT-1)$	7,41	-0,80
PC-1 e TOT-1	$((PC-1) - (TOT-1))/(TOT-1)$	-10,31	-12,37
PD-1 e TOT-1	$((PD-1) - (TOT-1))/(TOT-1)$	1,84	-0,78

Fonte: autor da tese.

Tabela 4.2 – Variação percentual do calor do decaimento - EPRs do grupo 2

Variação Percentual Grupo 2			
		Estacionária	Transiente
		(%)	(%)
PA-2 e TOT-2	$((PA-2) - (TOT-2))/(TOT-2)$	0,48	0,41
PB-2 e TOT-2	$((PB-2) - (TOT-2))/(TOT-2)$	0,38	-0,14
PC-2 e TOT-2	$((PC-2) - (TOT-2))/(TOT-2)$	-6,52	-7,10
PD-2 e TOT-2	$((PD-2) - (TOT-2))/(TOT-2)$	0,85	0,15

Fonte: autor da tese.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 4.1 a 4.4 e Tabelas 4.1 e 4.2, observa-se que, com exceção dos experimentos PC-1 e PC-2, todos os outros apresentaram estimativas de calor de decaimento muito próximas dos TOT-1 e TOT-2, com variações entre -0,8% e 1,84%. Como já mencionado no capítulo anterior, os atrasos verificados para o início da transiente foram da ordem de 27min40 para o PC-1 e de 27min50 para o PC-2. Para o início da condição estacionária, os atrasos foram de aproximadamente 23min50 para o PC-1 e de 26min para o PC-2. Esses atrasos causaram uma diferença no calor de decaimento de -12,4% a -10,3% entre o experimento PC-1 e o TOT-1, e uma diferença de -7,1% a -6,5% entre o experimento PC-2 e o TOT-2. Essas diferenças foram levadas em consideração nos resultados das temperaturas dos experimentos PC-1/2. Portanto, é possível a realização da comparação entre os cinco experimentos em cada um dos dois grupos analisados nesse trabalho.

Os perfis dos níveis de esvaziamento em função do tempo, em condição estacionária e de reenchimento, para cada um dos experimentos realizados dos grupos 1 e 2 são apresentados nas Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente.

Figura 4.5 – Níveis dos experimentos do grupo 1

Fonte: autor da tese.

Figura 4.6 – Níveis dos experimentos do grupo 2

Fonte: autor da tese.

Nas Tabelas 4.3 e 4.4, são apresentados os níveis de esvaziamento e os tempos correspondentes para cada um dos quatro pontos de observação A-B-C-D (Figura 3.27) referentes aos experimentos dos grupos 1 e 2, respectivamente.

Tabela 4.3 – Níveis de esvaziamento e os respectivos tempos para os quatro pontos de observação – Experimentos do grupo 1

Localização	Experimento	TOT-1	PA-1	PB-1	PC-1	PD-1
Ponto A	Nível (mm)	5280	5226	5218	5235	5160
	Tempo (s)	0	0	0	0	0
Ponto B	Nível (mm)	3759	3912	4032	4087	4212
	Tempo (s)	827	635	569	516	454
Ponto C	Nível (mm)	3755	3910	4025	4080	4212
	Tempo (s)	5519	5414	5355	5379	3724
Ponto D	Nível (mm)	5260	5253	5259	5250	5264
	Tempo (s)	6454	6332	6221	6289	6070

Fonte: autor da tese.

Tabela 4.4 – Níveis de esvaziamento e os respectivos tempos para os quatro pontos de observação – Experimentos do grupo 2

Localização	Experimento	TOT-2	PA-2	PB-2	PC-2	PD-2
Ponto A	Nível (mm)	5226	5226	5198	5243	5251
	Tempo (s)	0	0	0	0	0
Ponto B	Nível (mm)	3756	3910	4031	4075	4216
	Tempo (s)	716	682	605	492	514
Ponto C	Nível (mm)	3758	3913	4038	4076	4215
	Tempo (s)	6294	6151	6255	5360	4601
Ponto D	Nível (mm)	5250	5246	5258	5264	5264
	Tempo (s)	7230	7096	8021	7272	7218

Fonte: autor da tese.

Os valores referentes aos níveis médio, mínimo e máximo; desvio padrão do nível; as velocidades e os tempos de esvaziamento e de reenchimento dos experimentos dos grupos 1 e 2, são apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6, respectivamente. São fornecidas ainda para comparação as vazões de esvaziamento e de reenchimento relativas à área da seção transversal da piscina do IEA-R1 que é de aproximadamente 28,737 m². (MAPRELIAN, 1998). Essas tabelas mostram, também, a precisão do instrumento de medição de nível, os níveis do bocal do ECI, das folgas do ECI e dos termopares TC3, TC6 e TC10. O nível médio é a média estatística calculada durante o tempo de permanência na condição de nível estacionário e o desvio padrão é o valor estatístico relativo a essa média, ou seja, o desvio padrão mede a dispersão ocorrida em relação ao nível médio.

Tabela 4.5 - Níveis, desvio padrão, velocidades e tempos – Experimentos do grupo 1

Experimentos	TOT-1	PA-1	PB-1	PC-1	PD-1
Nível médio (mm)	3747	3909	4018	4073	4214
Nível mínimo (mm)	3729	3886	3996	4053	4189
Nível máximo (mm)	3768	3928	4038	4112	4237
Precisão do instrumento $\pm 0,5\%$ (mm)	± 19	± 20	± 20	± 20	± 21
Desvio padrão do Nível	5	4	5	6	7
Nível do bocal do ECI (mm)	3840	3840	3840	3840	3840
Nível das folgas do ECI (mm)	4000	4000	4000	4000	4000
Nível do termopar TC3 (mm)	4410	4410	4410	4410	4410
Nível do termopar TC6 (mm)	4230	4230	4230	4230	4230
Nível do termopar TC10 (mm)	4110	4110	4110	4110	4110
Velocidade de esvaziamento (mm/s)	1,8	2,1	2,1	2,2	2,1
Vazão de esvaziamento relativa ao IEA-R1 (m ³ /h)	190	217	217	228	217
Tempo de esvaziamento (s)	827	635	569	516	454
Velocidade de reenchimento (mm/s)	1,6	1,5	1,4	1,3	0,4
Vazão de reenchimento relativa ao IEA-R1 (m ³ /h)	167	151	147	133	46
Tempo de reenchimento (s)	935	918	866	910	2346

Fontes: autor da tese; VALIDYNE, 2017.

Tabela 4.6 - Níveis, desvio padrão, velocidades e tempos – Experimentos do grupo 2

Experimentos	TOT-2	PA-2	PB-2	PC-2	PD-2
Nível médio (mm)	3747	3911	4023	4074	4214
Nível mínimo (mm)	3696	3893	4002	4050	4199
Nível máximo (mm)	3779	3935	4045	4102	4227
Precisão do instrumento $\pm 0,5\%$ (mm)	± 19	± 20	± 20	± 20	± 21
Desvio padrão do Nível	5	6	6	6	5
Nível do bocal do ECI (mm)	3840	3840	3840	3840	3840
Nível das folgas do ECI (mm)	4000	4000	4000	4000	4000
Nível do termopar TC3 (mm)	4410	4410	4410	4410	4410
Nível do termopar TC6 (mm)	4230	4230	4230	4230	4230
Nível do termopar TC10 (mm)	4110	4110	4110	4110	4110
Velocidade de esvaziamento (mm/s)	2,0	1,9	1,9	2,4	2,0
Vazão de esvaziamento relativa ao IEA-R1 (m ³ /h)	207	197	197	248	207
Tempo de reenchimento (s)	716	682	605	492	514
Velocidade de reenchimento (mm/s)	1,6	1,4	0,7	0,6	0,4
Vazão de reenchimento relativa ao IEA-R1 (m ³ /h)	165	146	71	64	41
Tempo de reenchimento (s)	936	945	1766	1912	2617

Fontes: autor da tese; VALIDYNE, 2017.

Nas Figuras 4.5 e 4.6 e Tabelas 4.3 a 4.6, observa-se que os níveis de esvaziamento dos experimentos TOT-1 e TOT-2 estão a aproximadamente 90 mm abaixo do nível do bocal do ECI, conforme Figura 3.28, configurando assim um descobrimento total e permitindo a convecção natural do ar nos canais internos do ECI.

Observa-se, também que para os experimentos PA-1 e PA-2, os níveis de esvaziamento estão acima do bocal do ECI, mas abaixo do nível das folgas, conforme Figuras 3.12 e 3.29, obstruindo parcialmente a entrada de ar pelo bocal, mas permitindo a sua circulação pelas folgas. Nos experimentos PB-1 e PB-2, os níveis de esvaziamento estão muito próximos ao nível das folgas.

O erro de precisão do medidor *Validyne* (VALIDYNE, 2017) e as flutuações nos níveis de esvaziamento mostraram, também, ser possível a passagem de ar pelas folgas, em ambos os experimentos.

Os experimentos PC-1, PC-2, PD-1 e PD-2 apresentam níveis de esvaziamento acima das folgas, obstruindo, assim, totalmente a passagem de ar para os canais internos do ECI.

As velocidades de esvaziamento variaram entre 1,8 mm/s e 2,4 mm/s as de reenchimento, entre 0,4 mm/s e 1,6 mm/s. Estas velocidades equivalem a vazões de esvaziamento relativas ao reator IEA-R1 entre 190 m³/h e 248 m³/h e de enchimento de 41 m³/h a 167 m³/h. As vazões de esvaziamento apontam para hipotéticos APRs na piscina do IEA-R1 e de reenchimento para hipotéticos reenchimentos na mesma piscina.

Na sequência, serão apresentadas as evoluções temporais das temperaturas dos termopares TC3, TC6 e TC10, que estão localizados na placa central, mas em diferentes níveis do ECI e foram utilizados em todos os experimentos simulados nesse trabalho (Figura 3.9). Esses termopares foram escolhidos por estarem localizados em uma região com menor influência da convecção natural do ar nas placas externas do ECI.

Na Figura 4.7, são apresentadas as evoluções temporais das temperaturas obtidas do termopar TC3 para os cinco experimentos do grupo 1 e na Figura 4.8 as temperaturas desse termopar para os mesmos experimentos do grupo 2. Por meio dos resultados apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8, podem ser identificados o início da circulação natural para os experimentos TOT-1, TOT-2,

PA-1, PA-2, PB-1 e PB-2 e o fim da circulação natural para os experimentos TOT-1, TOT-2 e PA-1/2. O início da circulação natural é identificado por um ponto de inflexão, com a diminuição na temperatura do termopar TC3. Esta redução ocorre quando o ar estagnado é aquecido até que a diferença de densidades seja suficiente para resultar no seu movimento, permitindo a admissão de ar mais frio no canal. O fim da circulação natural é indicado por outro ponto de inflexão com uma pequena elevação na temperatura no termopar. Este aumento é devido à obstrução da entrada do ar, pela água de reenchimento. O ar então fica estagnado e é aquecido levemente, até a remoção efetiva do calor pela água de reenchimento.

O termopar TC3 foi o que apresentou maiores temperaturas máximas no ECI para todos os experimentos realizados nesse trabalho.

É importante mencionar que no APÊNDICE D, onde são fornecidas as comparações entre os experimentos de mesmo nível de descobrimento, é possível a visualização das curvas de nível de água, juntamente a as da temperatura no termopar TC3, para os dez experimentos.

Figura 4.7 – Curvas das temperaturas do TC3 nos experimentos do grupo 1

Fonte: autor da tese.

Figura 4.8 – Curvas das temperaturas do TC3 nos experimentos do grupo 2

Fonte: autor da tese.

Os termopares TC2, TC3 e TC4 estão localizados na parte mais alta do ECI, em relação aos demais termopares desse elemento, em um nível aproximado de 4410 mm. Como já visto na Figura 3.9 e na Tabela 3.3, as localizações radiais dos termopares são as seguintes: o TC3 está na parte central, o TC2, na lateral direita e o TC4, na lateral esquerda do ECI.

Nas Tabelas 4.7 e 4.8, são fornecidas as temperaturas máximas do termopar TC3 para todos os experimentos realizados, as suas variações percentuais e as diferenças das temperaturas (em valores absolutos) desse termopar em relação aos experimentos de descobrimento total para os grupos 1 e 2, respectivamente. Também são fornecidas as temperaturas máximas dos termopares TC2 e TC4, as variações percentuais destes dois termopares laterais e as diferenças de temperaturas (em valores absolutos) com relação ao termopar central (TC3). O índice *i* do termo EPRI que aparece nessas tabelas são relativos aos valores do termopar TC3 para cada um dos experimentos: TOT-1, TOT-2, PA-1, PA-2, PB-1, PB-2, PC-1, PC-2, PD-1 e PD-2.

Tabela 4.7 – Comparações das máximas temperaturas dos termopares TC2, TC3 e TC4 - Grupo 1

EPR	TC2	Variação Percentual e Diferença TC3 e TC2		TC3	Variação Percentual (EPRI-1) - (TOT-1)/ (TOT-1) e Diferença TC3		TC4	Variação Percentual e Diferença TC4 e TC3	
	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)
TOT-1	120,6	-2,6	3,2	123,8	0,0	0,0	120,1	3,1	3,8
PA-1	119,3	-2,7	3,3	122,6	-1,0	1,3	118,6	-3,3	4,0
PB-1	116,0	-2,6	3,1	119,1	-3,9	4,8	115,3	-3,2	3,8
PC-1	95,4	-2,1	2,0	97,4	-21,4	26,5	94,9	-2,6	2,5
PD-1	85,9	-1,8	1,6	87,4	-29,4	36,4	85,5	-2,2	2,0

Fonte: autor da tese.

Tabela 4.8 – Comparações das máximas temperaturas dos termopares TC2, TC3 e TC4 - Grupo 2

EPR	TC2	Variação Percentual e Diferença TC3 e TC2		TC3	Variação Percentual ((EPRI-2) - (TOT-2))/ (TOT-2) e Diferença TC3		TC4	Variação Percentual e Diferença TC4 e TC3	
	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)
TOT-2	99,4	-2,3	2,3	101,7	0,0	0,0	99,1	-2,6	-2,6
PA-2	97,3	-2,1	2,1	99,4	-2,3	2,3	96,9	-2,5	-2,5
PB-2	93,2	-2,2	2,1	95,3	-6,3	6,4	92,8	-2,6	-2,5
PC-2	79,4	-1,9	1,5	80,9	-20,5	20,8	79,1	-2,2	-1,8
PD-2	70,0	-1,3	0,9	70,9	-30,3	30,8	69,8	-1,6	-1,1

Fonte: autor da tese.

Nos dez experimentos realizados, o termopar TC2 apresentou variações percentuais de temperaturas de 1,3% a 2,7% menores do que as do TC3. Para o termopar TC4, as temperaturas ficaram entre 1,6% e 3,3% menores do que as do TC3 (Tabelas 4.7 e 4.8).

Como mencionado anteriormente, as variações percentuais dos fatores de potência radiais nas placas laterais são de 24,2% a 28,6% maiores do que na placa central, conforme Tabela 3.5. Portanto, houve uma troca térmica por convecção natural eficiente nas placas laterais do ECI na altura desses termopares, proporcionando, assim, uma troca térmica radial eficaz para esse nível de descobrimento.

Na Figura 4.9, são apresentadas as comparações dos valores máximos das temperaturas do TC3 para os dez experimentos realizados nesse trabalho.

Figura 4.9 – Temperaturas máximas do TC3 para cada um dos dez experimentos – Grupos 1 e 2

Fonte: autor da tese.

Da Figura 4.9 e das Tabelas 4.7 e 4.8, verificou-se que as maiores temperaturas máximas atingidas para o termopar TC3 ocorreram para os experimentos de perda total de refrigerante, TOT-1 e TOT-2. Foi no experimento de perda total de água para o grupo1(TOT-1) que se atingiu o maior valor da temperatura, 123,8°C. Todos os valores máximos de temperatura foram menores do que o valor adotado como temperatura limite de segurança de 130°C, considerada como a máxima temperatura permitida para o ECI. Esses valores estiveram, também, bem abaixo da temperatura de empolamento do combustível, de 500°C

Verificou-se também que o valor máximo da temperatura do TC3 no experimento PA-1 foi de 122,6°C, apenas 1% (1,2°C) menor que a do TOT-1. No experimento PA-2, a temperatura máxima ficou 2% (2,1°C) menor que a do TOT-2. Apesar dos experimentos PA-1 e PA-2 apresentarem temperaturas muito próximas aos TOT-1 e TOT-2, havia uma expectativa que esses experimentos fossem os mais críticos e apresentassem temperaturas maiores que os de descobrimento total. A justificativa para esses resultados pode ser atribuída às folgas no bocal do ECI, que permitiram a passagem de ar com a efetiva circulação natural nas placas internas do ECI. Também, as baixas potências de decaimento utilizadas nos experimentos

podem ser um dos motivos pelos quais essas temperaturas não foram as mais altas. Um outro aspecto que deve ser levado em consideração foi a ausência de um isolamento térmico nas laterais externas do ECI, o que contribuiu para uma livre e efetiva convecção natural nas faces externas desse elemento.

Como nos experimentos PB-1 e PB-2, o nível de descobrimento ficou muito próximo ao nível das folgas, ainda foi observada a convecção natural interna do ar no ECI. Ademais, houve a convecção do ar nas faces externas do ECI e uma maior transferência de calor desse elemento para a água de cobertura, através da convecção natural da água, portanto, as temperaturas obtidas no termopar TC3 ficaram entre 4% e 6% menores, quando comparadas com as dos experimentos TOT-1 e TOT-2, respectivamente. Esta transferência de calor está associada à condução radial e axial no ECI. Observou-se, também, que até o início da circulação natural nos experimentos PA-1, PA-2, PB-1 e PB-2 foram registradas temperaturas maiores no termopar TC3 do que as temperaturas dos experimentos TOT1 e TOT-2.

Com relação aos experimentos PC-1, PC-2, PD-1e PD-2, houve uma transferência de calor muito mais eficiente do ECI devido à água de cobertura. Esta maior transferência é devida principalmente à convecção natural com a água de cobertura, que está associada à grande condução de calor radial e axial no ECI. Os resultados mostraram que as temperaturas no termopar TC3, para os experimentos PC-1 e PC-2, foram em torno de 20% menores em relação às dos TOT-1 e TOT-2 e as temperaturas alcançadas pelos PD-1 e PD-2 foram aproximadamente 30% menores, quando comparadas com os experimentos de esvaziamento total. O menor valor das temperaturas máximas do termopar TC3, dentre os experimentos do grupo 1, foi de 87,4°C para o experimento PD-1. Dentre os experimentos do grupo 2, o PD-2 atingiu o menor valor, que foi de 70,9°C. Os calores de decaimento estimados para os PC-1 e PC-2 foram de 6,5% a 12,4% menores que os dos experimentos TOT-1 e TOT-2.

Com exceção do experimento PC-1, que teve um menor calor de decaimento, todos os outros experimentos do grupo 1, quando relacionados ao de descobrimento total, apresentaram as menores variações percentuais para o termopar TC3, quando comparados com as correspondentes variações percentuais do grupo 2. Esse comportamento pode estar associado a uma possível influência da intensidade do calor de decaimento sobre os mecanismos de transferência de calor.

A influência do calor de decaimento sobre cada par de experimentos de mesmo nível de descobrimento será abordada no APÊNDICE D.

Nas Figuras 4.10 e 4.11, são apresentadas as evoluções temporais das temperaturas do termopar TC6 para os grupos 1 e 2, respectivamente. Nessas figuras também estão indicados o início e o fim da circulação natural dos experimentos TOT-1 e TOT-2.

Nas Tabelas 4.9 e 4.10, estão listadas as temperaturas máximas do termopar TC6 para todos os experimentos, as suas variações percentuais e as diferenças das temperaturas (em valores absolutos) desse termopar em relação aos experimentos de descobrimento total para os grupos 1 e 2, respectivamente. Nessas tabelas, também, são fornecidas as temperaturas máximas dos termopares TC5 e TC7 e suas variações percentuais com relação ao termopar TC6.

Os termopares TC5, TC6 e TC7 encontram-se no nível próximo de 4230 mm, ou seja, 180 mm abaixo do termopar TC3.

Figura 4.10 – Temperaturas do TC6 para cada um dos experimentos do grupo 1

Fonte: autor da tese.

Figura 4.11 - Temperaturas do TC6 para cada um dos experimentos do grupo 2

Fonte: autor da tese.

Tabela 4.9 – Comparações das máximas temperaturas dos termopares TC5, TC6 e TC7 - Grupo 1

EPR	TC5	Variação Percentual e Diferença TC5 e TC6		TC6	Variação Percentual ((EPRi - 1)- (TOT-1))/ (TOT-1) e Diferença TC6		TC7	Variação Percentual e Diferença TC7 e TC6	
	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)
TOT-1	109,1	-5,3	6,1	115,3	0,0	0,0	109,8	-4,7	5,5
PA-1	110,3	-5,5	6,4	116,7	1,3	1,5	110,7	-5,2	6,1
PB-1	102,7	-5,5	5,9	108,6	-5,8	6,6	103,4	-4,9	5,3
PC-1	77,4	-5,3	4,3	81,7	-29,1	33,6	78,0	-4,5	3,7
PD-1	54,8	-8,8	5,3	60,0	-47,9	55,3	55,5	-7,5	4,5

Fonte: autor da tese.

Tabela 4.10 – Comparações das máximas temperaturas dos termopares TC5, TC6 e TC7 - Grupo 2

EPR	TC5	Variação Percentual e Diferença TC5 e TC6		TC6	Variação Percentual ((EPRi - 2)- (TOT-2))/ (TOT-2) e Diferença TC6		TC7	Variação Percentual e Diferença TC7 e TC6	
	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)
TOT-2	91,8	-5,1	4,9	96,7	0,0	0,0	92,4	-4,4	4,3
PA-2	90,4	-5,1	4,9	95,3	-1,4	1,4	90,7	-4,8	4,6
PB-2	82,4	-5,2	4,5	86,9	-10,1	9,8	83,1	-4,4	3,8
PC-2	65,6	-4,8	3,3	68,9	-28,7	27,8	66,1	-4,1	2,8
PD-2	45,5	-9,9	5,0	50,5	-47,8	46,2	46,3	-8,3	4,2

Fonte: autor da tese.

Com exceção dos experimentos PD1 e PD-2, verificou-se que para os outros casos houve uma redução de 4% a 5,5% nas temperaturas máximas dos termopares TC5 e TC7 em relação às temperaturas do termopar TC6, indicando, assim, que ocorreu uma transferência de calor radial eficiente nesse nível do ECI. Como os níveis de descobrimento dos experimentos PD-1 e PD-2 estão muito próximos ao nível do termopar TC6, constatou-se que houve uma forte influência da água no processo de transferência de calor radial com uma redução de 7,5% a 10% nas temperaturas dos termopares TC5 e TC7 em relação às do TC6.

Devido à proximidade do termopar TC6 ao nível de descobrimento dos experimentos PD-1 e PD-2, observa-se que houve uma redução de aproximadamente 48% nas temperaturas desse termopar em relação às temperaturas dos experimentos TOT-1 e TOT-2. No caso do termopar TC6, o experimento que apresentou a maior temperatura foi o PA-1 e não o TOT-1. A temperatura do experimento PA-1 se manteve acima do TOT-1 em quase todo o transiente e a maior temperatura do termopar TC6 foi de 1,3% superior ao TOT-1

Na Figura 4.12, são apresentadas as comparações dos valores máximos das temperaturas do termopar TC6 para os dez experimentos analisados.

Figura 4.12 – Temperaturas máximas do TC6 para cada um dos dez experimentos – Grupos 1 e 2

Fonte: autor da tese.

A evolução temporal da temperatura do termopar TC10 pode ser vista por meio das Figuras 4.13 e 4.14, para os grupos 1 e 2, respectivamente. Também podem ser observados, nessas figuras, o início e o fim da circulação natural dos experimentos TOT-1 e TOT-2.

As Tabelas 4.11 e 4.12 apresentam as comparações das temperaturas máximas dos termopares TC8, TC10 e TC12, para os experimentos dos grupos 1 e 2, respectivamente. Além disso, são fornecidas as suas variações percentuais e as diferenças das temperaturas (em valores absolutos) desse termopar em relação aos experimentos de descobrimento total para os grupos 1 e 2, respectivamente

Os termopares TC8, TC10 e TC12 estão localizados em um nível próximo de 4110 mm, cerca de 300 mm abaixo do termopar TC3, posição essa inferior ao nível de descobrimento dos experimentos PD1/2 e muito próxima dos níveis dos experimentos PC1/2.

Figura 4.13 – Temperaturas do termopar TC10 para cada um dos experimentos do grupo 1

Fonte: autor da tese.

Figura 4.14 – Temperaturas do termopar TC10 para cada um dos experimentos do grupo 2

Fonte: autor da tese.

Tabela 4.11 – Comparações das máximas temperaturas dos termopares TC8, TC10 e TC12 - Grupo 1

EPR	TC8	Variação Percentual e Diferença TC8 e TC10		TC10	Variação Percentual e Diferença TC10 ((EPRI-1)- (TOT-1))/ (TOT-1)		TC12	Variação Percentual e Diferença TC12 e TC10	
	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)
TOT-1	93,8	-6,9	7,0	100,8	0,0	0,0	93,9	7,3	-6,9
PA-1	94,3	-6,9	7,0	101,3	0,5	0,5	94,4	7,3	-6,9
PB-1	80,8	-5,9	5,1	85,9	-14,8	14,9	81,0	6,0	-4,9
PC-1	49,1	-7,3	3,9	53,0	-47,5	47,8	49,1	7,9	-3,9
PD-1	35,6	-8,2	3,2	38,8	-61,5	62,0	35,4	9,5	-3,4

Fonte: autor da tese.

Tabela 4.12 – Comparações das máximas temperaturas dos termopares TC8, TC10 e TC12 – Grupo 2

EPR	TC8	Variação Percentual e Diferença TC8 e TC10		TC10	Variação Percentual e Diferença TC10 ((EPRI-2)- (TOT-2))/ (TOT-2)		TC12	Variação Percentual e Diferença TC12 e TC10	
	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)		(%)	(°C)
TOT-2	81,1	-5,6	4,8	85,9	0,0	0,0	81	-5,7	4,9
PA-2	77,9	-5,0	4,1	82	-4,5	3,9	77,9	-5,0	4,1
PB-2	65,3	-4,1	2,8	68,1	-20,7	17,8	65,4	-4,0	2,7
PC-2	43,3	-6,1	2,8	46,1	-46,3	39,8	43,2	-6,3	2,9
PD-2	34,1	-5,5	2,0	36,1	-58,0	9,8	33,8	-6,4	2,3

Fonte: autor da tese.

Na Figura 4.15, são apresentas as temperaturas máximas do termopar TC10 para os dez experimentos analisados nesse trabalho.

Figura 4.15 – Temperaturas máximas do TC10 para cada um dos dez experimentos

Fonte: autor da tese.

Por meio das Tabelas 4.11 e 4.12 e das Figuras 4.13, 4.14 e 4.15, constatou-se que para experimento PA-1 o valor máximo da temperatura para o termopar TC-10 ficou 0,5% maior do que no TOT-1 e, conseqüentemente, maior em relação às temperaturas dos outros experimentos do grupo 1. Para os experimentos do grupo 2, o TOT-2 foi o que apresentou as maiores temperaturas. No PA-2, o TC10 teve valores 4,5% menores do que o TOT-2.

Nos experimentos PB1/2 as temperaturas máximas no TC10, ficaram de 14,8% a 20,7% menores que nos experimentos TOT-1 e TOT-2, indicando, assim, uma importante remoção de calor pela água de cobertura sobre as temperaturas desse termopar.

Verificou-se que, durante os experimentos PD1 e PD-2, o termopar TC10 esteve submerso devido à proximidade da localização do termopar e o nível dos experimentos e, por este motivo, houve uma forte remoção de calor por convecção natural. O mesmo comportamento foi observado para os experimentos PC-1 e PC-2,

ou seja, devido à proximidade desses experimentos com o nível do termopar TC10 ocorreu, também, a remoção de calor por meio da água de cobertura.

Nas Tabelas 4.13 e 4.14, são apresentadas as variações percentuais axiais e as diferenças das temperaturas (em valores absolutos) do termopar TC3 com relação aos termopares TC6 e TC10, para os experimentos dos grupos 1 e 2, respectivamente. Também são fornecidas as seguintes informações: as variações percentuais dos fatores de potência axial normalizada entre as posições dos termopares TC6 e TC10 com relação à posição do termopar TC3 e as relações entre as variações percentuais das temperaturas e o fator de potência, para os termopares indicados nas tabelas.

Tabela 4.13 – Variações percentuais e diferença das temperaturas dos termopares TC6 e TC10 com o TC3 – Grupo 1

EPR	Variação Percentual e Diferença TC3 e TC6		Relação da Variação TC3 e TC6 com Fator Axial	Variação Percentual e Diferença TC3 e TC10		Relação da Variação TC3 e TC10 com Fator Axial
	(%)	(°C)		(%)	(°C)	
TOT-1	7	8,6	120	23	23,1	39
PA-1	5	5,9	81	21	21,3	36
PB-1	10	10,4	156	39	33,2	66
PC-1	19	15,7	311	84	44,4	143
PD-1	46	27,4	740	125	48,6	214
Variação Percentual Fator de Potência Axial	6			59		

Fonte: autor da tese.

Tabela 4.14 – Variações percentuais e diferença das temperaturas dos termopares TC6 e TC10 com o TC3 – Grupo 2

	Variação Percentual e Diferença TC3 e TC6		Relação da Variação TC3 e TC6 com Fator Axial	Variação Percentual e Diferença TC3 e TC10		Relação da Variação TC3 e TC10 com Fator Axial
	(%)	(°C)		(%)	(°C)	
TOT-2	5	5,0	84	18	15,8	31
PA-2	4	9,1	70	21	17,4	36
PB-2	10	8,4	156	40	27,2	68
PC-2	17	12,0	282	75	34,8	129
PD-2	40	20,4	654	96	34,8	164
Variação Percentual Fator de Potência Axial	6			59		

Fonte: autor da tese.

Nas Figuras 4.16 e 4.17, são mostradas as comparações das variações percentuais axiais dos termopares TC6 e TC10 com relação ao TC3 para os experimentos dos grupos 1 e 2, respectivamente.

Figura 4.16 – Comparação das variações percentuais das temperaturas e fatores de potência dos termopares TC6 e TC10 com o TC3 - Grupo 1

Fonte: autor da tese.

Figura 4.17 – Comparação das variações percentuais das temperaturas e fatores de potência dos termopares TC6 e TC10 com o TC3 - Grupo 2

Fonte: autor da tese.

Nas Tabelas 4.13 e 4.14 e nas Figuras 4.16 e 4.17, as relações das variações das temperaturas axiais com as posições entre TC3 e TC6 nos experimentos PA-1/2 e TOT-1/2 estiveram em torno de 100%, tendo assim um comportamento quase diretamente proporcional à essa variação. Já nos experimentos PB-1/2, essas relações chegaram a 156%, ou seja, mais de 50% maior que a relação de potências axiais, mostrando uma pequena influência da água de cobertura sobre esses dois experimentos. Para os experimentos PC-1 e PC-2 essa relação ficou em 311% e 282% e, elevando, assim, a relação de potências axiais de 182% e 211%. Por fim, essas mesmas relações nos experimentos PD-1 e PD-2, foram de 740% e 654%, aumentando a diferença em até 640%. Estes quatro últimos experimentos (PC-1, PC-2, PD-1 e PD-2) apresentaram porcentagens elevadas devido à forte influência da água de cobertura.

As variações das temperaturas do termopar TC3 com relação às do TC10 são menores que as variações axiais dos fatores de potência nos experimentos TOT-1 e TOT-2, PA-1 e PA-2 e PB-1 e PB-2. Nos experimentos PC1 e PC-2 e PD-1 e PD-2 esta relação de temperaturas foi de 30% a 160% maior que a relação de potências, indicando novamente a forte influência da água de cobertura.

É importante mencionar a forte influência da água de cobertura nos experimentos PB-1, PB-2, PC-1, PC-2, PD-1 e PD-2, devida a convecção natural com a água e que está associada à condução de calor radial e axial no ECI. A remoção de calor pela convecção natural com a água foi muito mais eficiente que a convecção natural com o ar.

Com base nos resultados experimentais obtidos nesse trabalho para os dez cenários analisados, as constatações mais importantes são que as temperaturas máximas ficaram:

- abaixo da temperatura limite de segurança de 130°C, considerada, nesse trabalho, como parâmetro de proteção para o ECI, garantindo assim a sua integridade física;
- abaixo da temperatura de empolamento do combustível, que é de 500°C.

Como já mencionado anteriormente, os resultados obtidos nesse trabalho entre os experimentos de mesmo nível de descobrimento foram comparados entre si e são fornecidos no APÊNDICE D. No APÊNDICE E podem ser vistos os resultados

obtidos e as comparações entre os termopares do fluido dispostos ao longo do ECI para todos os experimentos realizados.

Na seção seguinte, são apresentadas as comparações teórico/experimental de dois experimentos, TOT-1 e PD-1, que foram selecionados e simulados teoricamente com o código RELAP5.

4.2 - Comparação teórica e experimental

A simulação teórica foi realizada com o código RELAP5, programa computacional escolhido pelo órgão regulador do Brasil (CNEN) para o licenciamento de plantas nucleares de potência e de pesquisa.

O RELAP5 tem a capacidade de simular Acidentes de Perda de Refrigerante Primário por Pequena ou Grande Ruptura (APRPPR ou APRPGR) em plantas nucleares de pesquisa e de potência. Além disso, pode simular transientes de perda de potência elétrica, perda de água de alimentação, perda de vazão, entre outros.

O RELAP5 possui seis equações de conservação: de massa, de energia e de quantidade de movimento para cada uma das fases, líquida e vapor. Possui, também, duas equações adicionais, sendo uma para gases não condensáveis e outra para o boro solúvel. O programa conta com uma aproximação da equação de conservação de quantidade de movimento para fluxo transversal e um modelo de fluxo reverso. Esse último, utiliza uma solução de condução bidimensional. O método numérico utilizado nesse código é o de diferenças finitas, tanto na fase líquida como na de vapor.

Nesse trabalho, as modelagens adotadas para simular os transientes propostos para o experimento STAR com o código RELAP5 foram detalhadas com a finalidade de descrever adequadamente o fenômeno de circulação natural durante os transientes propostos. Por esta razão, todos os canais de resfriamento do elemento combustível instrumentado foram modelados, assim como as placas combustíveis e as estruturas metálicas, representadas pelas estruturas de troca de calor, além da modelagem do casco da STAR. Todas as informações sobre o RELAP5 e a modelagem adotada nesse trabalho encontram-se no ANEXO 2²⁰.

²⁰ Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDIJIAN, G. em 2017.

No ANEXO 2, são apresentadas a descrição do código RELAP5, a nodalização utilizada para modelar a seção STAR e o ECI. São apresentados, também, os resultados obtidos com o código RELAP5 para dois experimentos um de descobrimento total e um parcial, o TOT-1 e o PD-1.

Os motivos pelos quais esses dois experimentos foram escolhidos, foram os seguintes:

1. o TOT-1, é um experimento de perda total de refrigerante na condição de maior calor de decaimento e que apresentou resultados com maiores temperaturas máximas em relação a todos os demais;
2. o PD-1, é um experimento de perda parcial no quarto nível de descobrimento na condição de maior calor de decaimento e apresentou as menores temperaturas máximas em relação aos demais do grupo 1.

Nas Figura 4.18 e 4.19, são apresentadas as comparações teórico/experimental das evoluções temporais dos níveis e das temperaturas do termopar TC3 para os experimentos TOT-1 e PD-1, respectivamente. Esse termopar TC3 foi o selecionado, pois apresentou os maiores valores experimentais de temperatura.

Figura 4.18 – Comparação teórico experimental dos níveis e temperaturas do TOT-1

Fontes: SABUNDJIAN, G.²¹; autor da tese.

²¹ Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDJIAN, G. em 2017.

As evoluções temporais da temperatura teórico/experimental do termopar TC3, obtidas para o caso de esvaziamento total da STAR (TOT-1, mostraram que os comportamentos são semelhantes (Figura 4.18). No entanto, os resultados alcançados com o código RELAP5, por ser mais conservativo, superaram os experimentais em média de 20°C ($\cong 144^{\circ}\text{C}$). No fim da simulação, a temperatura do termopar TC3 diminui até chegar ao seu valor inicial de 31°C, comportamento esse similar ao observado experimentalmente.

Figura 4.19 - Comparação teórico experimental dos níveis e temperaturas do PD-1

Fontes: SABUNDJIAN, G.²²; autor da tese.

Na Figura 4.19, é apresentada a comparação teórico/experimental da evolução temporal da temperatura do termopar TC3 para o experimento PD-1, cujos resultados são semelhantes, sendo que os valores obtidos com o RELAP5 superam os experimentais em 40°C ($\cong 127^{\circ}\text{C}$), durante o período de esvaziamento parcial da STAR. Os valores da temperatura do termopar TC3 obtidos com o RELAP5 para o caso de esvaziamento parcial foram inferiores aos do esvaziamento total, pelo fato de que também houve uma eficiente transferência de calor no ECI, devido à água de cobertura, seguindo assim, o comportamento experimental.

²² Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDJIAN, G. em 2017.

A Tabela 4.15 fornece uma comparação teórico/experimental das temperaturas máximas e das médias dos níveis dos experimentos PD-1 e TOT-1. Também, são apresentadas as variações percentuais e as diferenças entre as temperaturas máximas e as variações percentuais das médias dos níveis ao longo de todo o transiente, dos resultados teórico/experimental.

Tabela 4.15 – Comparação teórico/experimental das máximas temperaturas do termopar TC3 e das médias dos níveis nos experimentos TOT-1 e PD-1

EPR	TC3 Máxima Experimental	TC3 Máxima RELAP5	Variação Percentual e Diferença - TC3 RELAP5 e Experimental		Variação Percentual - Média dos Níveis RELAP5 e Experimental
	(°C)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
TOT-1	123,8	144,4	17	20,6	1,2
PD-1	87,4	126,9	45	39,5	1,5

Fontes: autor da tese; SABUNDJIAN, G.²³

Nas Figuras 4.18 e 4.19 e na Tabela 4.15, foi verificado que a evolução temporal do nível de líquido obtido com o RELAP5, durante o esvaziamento e o reenchimento da STAR, é praticamente coincidente com o experimental, demonstrando, assim, que foi possível reproduzir teoricamente os experimentos TOT-1 e PD-1. Observou-se, no entanto, uma pequena diferença no reenchimento do experimento PD-1, devido às diferenças entre as velocidades de reenchimento teórica e experimental. As variações percentuais entre as médias dos níveis teóricos e experimentais ao longo de todo o transiente resultou em valores de 1,2% para o TOT-1 e 1,5% para o PD-1.

Foi observada ainda uma boa concordância entre os valores máximos de temperatura do termopar TC3. Os resultados com o RELAP5 foram 17% maior em relação ao experimento TOT-1 e 25% maior para o PD-1. Os resultados de temperatura obtidos com o RELAP5 apresentaram um comportamento conservativo contribuindo, assim, para a segurança da instalação.

Os resultados teóricos demonstraram que, mesmo que as temperaturas do termopar TC3 tenham superado as temperaturas experimentais, devido às

²³ Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDJIAN, G. em 2017.

hipóteses conservativas assumidas pelo RELAP5, podem ser utilizados para uma avaliação prévia do ECI, em caso de esvaziamento total e parcial da STAR.

As temperaturas teóricas do termopar TC3 obtidas com o código RELAP5, em ambos os casos estudados, foram muito inferiores à temperatura de empolamento do alumínio (500°C) mostrando, assim, que os cálculos teóricos podem ser utilizados para uma avaliação preliminar do comportamento do ECI em caso de esvaziamento total e parcial da STAR.

Embora, os resultados teóricos apresentaram o mesmo comportamento que os experimentais para os dois cenários estudados, esvaziamento total (TOT-1) e parcial (PD-1), existe a possibilidade de realizar uma análise de sensibilidade/incertezas com o *software* SUSA(KLOSS, 2015). Essa análise não foi realizada nesse trabalho pelo fato de requerer muitas horas de simulação e poderá ser feita em trabalhos futuros.

No ANEXO 2, são apresentadas algumas das variáveis adicionais que o código RELAP5 fornece, tais como: a fração de vazio, o regime de escoamento e o modo de transferência de calor para cada um dos experimentos simulados, a fim de compreender melhor a fenomenologia dos transientes propostos nesse trabalho.

5. CONCLUSÕES

Os resultados dos dez experimentos realizados nesse trabalho se mostraram relevantes para a análise de segurança de acidentes de perda de refrigerante em reatores de pesquisa, pois poderão ser utilizados como banco de dados no processo de licenciamento desse tipo de instalação.

Por meio dos experimentos foi possível realizar a comparação entre os cinco níveis de descobrimento para duas condições distintas de calor de decaimento do elemento combustível real e instrumentado, em condições bem semelhantes às observadas durante os acidentes de perda de refrigerante em reatores de pesquisa.

Uma das mais importantes constatações desse trabalho foi que a maior temperatura atingida nos termopares entre todos os experimentos realizados foi de 123°C e com o RELAP5 foi de 145°C, valores esses bem abaixo da temperatura de empolamento do combustível, que é de 500°C. Além disso, todos os resultados experimentais ficaram abaixo da temperatura limite de segurança de 130°C, considerada, nesse trabalho, como parâmetro de proteção para o ECI, garantindo assim a sua integridade física.

A seção STAR mostrou-se uma ferramenta muito segura, já que não ocorreu nenhum acidente ou incidente envolvendo a seção ou o ECI, e também porque os níveis de dose na superfície da piscina durante os experimentos, monitorados pela proteção radiológica do IPEN, se mantiveram normais.

A folga entre o bocal e as placas do ECI, presente em todos os elementos combustíveis padrão fabricados no IPEN, mostrou-se eficaz no processo de remoção de calor em caso de um APR. Dessa forma, manter a passagem do ar por meio das folgas ou até incrementá-las na fabricação de novos elementos combustíveis, contribuirá para a eficiente remoção de calor por circulação natural.

Essa conclusão é útil no que se refere ao processo de transferência de calor dos elementos combustíveis do novo Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), pois, em vez de folgas, possui duas janelas laterais entre o bocal e o início das placas combustíveis, demonstrando, assim, que poderá ocorrer uma maior transferência de calor por convecção natural no caso de um descobrimento parcial do núcleo.

Os experimentos de descobrimento total foram os mais críticos, pois apresentaram as maiores temperaturas do revestimento no ECI, em comparação aos demais experimentos de descobrimentos parciais.

Em todos os experimentos de descobrimento parcial, verificou-se que a água de cobertura foi sempre benéfica no processo de remoção de calor de decaimento. A convecção natural com a água de cobertura, associada à condução de calor radial e axial no ECI mostraram-se como um ótimo mecanismo de remoção de calor durante este tipo de descobrimento.

A simulação teórica dos experimentos com o RELAP5 mostrou que os comportamentos dos níveis de esvaziamento e reenchimento para os dois cenários estudados apresentaram uma ótima concordância com os experimentais, com variações percentuais entre os níveis médios de 1,2% a 1,5%. Portanto, a modelagem adotada para a simulação dos casos analisados conseguiu reproduzir corretamente as condições experimentais.

Deve ser ressaltado que os resultados de temperatura obtidos com o RELAP5 mostraram um comportamento conservativo, com variações percentuais de 17% a 45% acima dos experimentais, o que colabora integralmente com a segurança da instalação. Esses resultados poderão ser utilizados para uma avaliação prévia do ECI em caso de um APR. Esses resultados são considerados preliminares e poderão ser aperfeiçoados com o uso de *softwares*, como o *Software for Uncertainty and Sensitivity (SUSA)*, desenvolvido pela *Global Research for Safety (GRS)* (KLOSS, 2015). O SUSA realiza as análises incertezas/sensibilidade dos dados de entrada e modelos do RELAP5.

Além disso, por meio da simulação teórica com o RELAP5, foi possível obter variáveis adicionais que, nesse trabalho não são obtidas experimentalmente, tais como: temperatura do fluido, fração de vazio, regimes de escoamento, mecanismos de transferência de calor, entre outras.

Os experimentos com a seção STAR, que mostrou ser um aparato experimental seguro e eficiente para aquisição de dados termo-hidráulicos na área de pesquisa e desenvolvimento, poderão ser utilizados em futuros trabalhos experimentais, na validação de modelos existentes no código RELAP5 e no processo de qualificação da modelagem da planta durante um transiente.

6. TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos, verificou-se a possibilidade das seguintes pesquisas futuras:

1) realização de novos experimentos com:

- a. a implantação de um isolamento térmico nas laterais externas do ECI para diminuir a transferência de calor por convecção nas laterais do elemento;
- b. condições de calor de decaimento e temperaturas maiores, a fim de permitir pesquisas sobre o fenômeno de transferência de calor em condições mais rigorosas;
- c. a colocação de aspersores sobre o ECI com o objetivo de simular a atuação do sistema de resfriamento de emergência dentro da STAR.

2) avaliação de incertezas/sensibilidade dos dados de entrada do RELAP5 com a finalidade de aprimorar os resultados teóricos. Para esse tipo de estudo será utilizado o código SUSA (KLOSS, 2015).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHARON, J.; HOCHBAUM, I. Partial Loss of Cooling Accident in MTR Fuel Element. In: CONFERENCE OF THE NUCLEAR SOCIETIES IN ISRAEL, 23rd, Feb. 15-16, 2006, Dead Sea, Israel, **Proceedings...** The Israel Nuclear Society, Israel Society for Radiation Protection, p. 142-144.

AHARON, J.; HOCHBAUM, I.; ZISKIND, G. Boiling in MTR Fuel Element Channels as Cooling Mechanism During Partial Loss-of-Coolant Accident (LOCA) in Pool Type Reactors. In: CONFERENCE OF THE NUCLEAR SOCIETIES IN ISRAEL, 24th, Feb. 19-21, 2008 Dead Sea, Israel, **Proceedings...** The Israel Nuclear Society, Israel Society for Radiation Protection, p. 309-312.

ALUTENT, **Pallet Alumínio PR – 1200 x 1000 -7T/2D - P30 – Pallets**. Desenho nº: CJ-06-0006-00, 2003.

APTPLOT version 6.6.1, 2015. Disponível em:
<<https://www.usnrc-ramp.com/content/aptpplot-installation-screenspng>> Acesso em: 10 dez. 2015.

BARTZIS, J. G.; MEGARITOU, A.; BELESSIOTIS, V. **THEAP-1, A Computer Program for Thermal Hydraulic Analysis of a Thermally Interacting Channel Bundle of Complex Geometry. Code Description and User's Manual**, Atenas, Greece, Institute of Nuclear Technology and Radiation Protection – NRCPS-DEMOCRITUS – DEMO 87/10, 1987.

BEJAN, A. **Convection Heat Transfer**. 4th ed. John Wiley & Sons Inc., Hoboken: New Jersey, 2013.

BELCHIOR JR, A.; ANDRADE, D. A.; SABUNDJIAN, G.; MACEDO, L. A.; ANGELO, G.; TORRES, W. M.; UMBEHAUN, P. E. Simulation of a refill/reflood experiment using the RELAP5 thermal-hydraulic code. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, Oct. 24-28, 2011, Belo Horizonte, MG, **Proceedings...**, INAC, 2011.

BOUSBIA-SALAH A.; MEFTAH B.; HAMIDOUCHE T.; SI-AHMED E. K. A Model for the Analysis of Loss of Decay Heat Removal During Loss of Coolant Accident in MTR Pool Type Research Reactors. **Annals of Nuclear Energy**, v. 33 p. 405–414, 2006.

BROMLEY, L. A. Heat Transfer in Stable Film Boiling. **Chemical Engineering Progress**, v.46, p. 221-227, 1950.

CHEN, J. C. A correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow. **Process Design and Development**, v. 5, n.3, p. 322-329, 1966.

CHEN, J. C.; SUNDARAM, R. K.; OZKAYNAK, F. T. **A Phenomenological Correlation for Post-CHF Heat Transfer**, NUREG-0237, Springfield: Nuclear Regulatory Commission, 1977.

CHURCHILL, S. W.; CHU, H. H. S. Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 18. pp. 1323-1329, 1975.

COELHO, P. R. P. **Padrão Experimental em Espectrometria de Nêutrons Rápidos Utilizando Nêutrons da Reação DT e Avaliação de Métodos de Cálculo de Blindagem**. 1993. 141p.Tese. (Doutorado em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear)) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br> > Acesso em 15 abr. 2016.

COLBURN, A. P.; HOUGEN, O. A. Design of Cooler Condensers for Mixtures of Vapors with Noncondensing Gases. **Industrial and Engineering Chemistry**, v.26, n.11, p. 1178-1182, 1934.

CONTEMP. **Certificado de calibração**. Nº 7421-16. São Paulo – SP. 27 de outubro de 2016.

COX J. A.; WEBSTER C.C. **Water-Loss Tests at the Low Intensity Testing Reactor**. USAEC Report, Oak Ridge National Laboratory, Aug. 1964 (ORNL-TM-632).

D'AURIA, F.; CAMARGO, C.; MAZZANTINI, O. The Best Estimate plus Uncertainty (BEPU) Approach in Licensing of Current Nuclear Reactors. **Nuclear Engineering and Design**, v. 248, p. 317– 328, 2012.

DITTUS, F. W.; BOELTER, L. M. K. **Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type**. Publications in Engineering, v. 2, n.13, Berkeley: University of California, 1930.

DREIER J.; WINKLER H., Results of the Mockup Experiment on Partial LOCA. Swiss Federal Institute for Reactor Research. In: THE 1984 INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS. **Proceedings...** ANL/RERTR/TM-6, 1985.

EL-WAKIL, M. M. **Nuclear heat transport**. New York - Int. Textbook, 1971.

ESDU. Engineering Science Data Unit, 73031, ESDU International Plc, 27, Corsham Street, London, N1 6UA, 1973.

ETHERINGTON, H. **Nuclear engineering handbook**. New York: McGraw-Hill, 1958.

FIORI, F. **Application of Best Estimate plus Uncertainty methods in licensing of Water Cooled Reactors**. 2009. Dissertação (Mestrado Universidade de Pisa).

FLOWLER, T. B.; VONDY, D. R.; CUNNINGHAM, G. W. **Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION**. Oak Ridge, Tenn.: Oak Ridge National Laboratory, July 1971. (ORNL-TM-2496 Rev.2).

HAMIDOUCHE, T.; SI-AHMED E., Analysis of Loss of Coolant Accident in MTR Pool Type Research Reactor. **Progress in Nuclear Energy**, v. 53, n.3, p. 285-289, 2011.

HOLMAN, J. P. **Transferência de calor**. 5 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1983.

IDAHO NATIONAL ENGINEERING LABORATORY. **RELAP5/MOD3 Code Manual, Code Structure, System Models, and Solution Methods**. NUREG/CR-5535, INEL-95/0174, volume 1, 1999.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Relatório de Análise de Segurança do Reator IEA-R1 – RAS**, São Paulo: IPEN, 2005.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Memorando Interno**, CRO, nº 005-2016, de 10 de junho de 2016.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Memorando Interno**, CRPq -CRO, nº 008-2016, de 4 de agosto de 2016a.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Memorando Interno**, CASI, nº 004-2016, de 5 de agosto de 2016b.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **One decade after Chernobyl: Summing up the Consequences of the Accident**. Vienna: IAEA, 1996.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **Safety Standards Series No. NS-R-4. Safety of Research Reactors. Safety Requirements**. Vienna: IAEA, 2005.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **Safety Reports Series No. 55. Safety Analysis for Research Reactors**. Vienna: IAEA, 2008.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **TECDOC-1624 Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants**. Vienna: IAEA, 2009.

ITO, D.; SAITO, Y. Natural convection cooling characteristics in a plate type fuel assembly of Kyoto University Research Reactor during loss of coolant accident. **Annals of Nuclear Energy**, v. 90, p. 1-8, 2016.

KAYS, W. M. Numerical Solution for Laminar Flow Heat Transfer in Circular Tubes. **TRANS. ASME**, v. 77, pp. 1265-1274, 1955.

KLOOS, M. **Software for Uncertainty and Sensitivity Analyses** – SUSAN, version 4.0. GRS, January 2015.

LAWRENCE, R. A.; PANCOAST, J. T., ASTR Loss-of-Fuel Coolant Test, **Trans. Amer. Nucl. Soc.** v. 9, n. 1, p. 298, 1966.

MAIORINO J.R.; PERROTTA J.A.; FRAJNDLICH R. The Conversion and Power Upgrading of IEA-R1 Experience and Perspective. In: THE 1998 INTERNATIONAL REDUCED ENRICHMENT FOR TEST REACTOR CONFERENCE, Oct. 18-23, 1998, São Paulo, SP, **Proceedings...**1998.

MAPRELIAN, E. **Análise de Acidentes de Perda de Refrigerante no Reator IEA-R1 a 5 MW**, 1998. 132 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) -Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>> Acesso em: 21 mai. 2010.

MAPRELIAN E.; WALMIR M. T.; UMBEHAUN P. E.; SABUNDJIAN G. **Proposta de Experimento de Perda de Refrigerante no Elemento Combustível Instrumentado do IEA-R1**, São Paulo, IPEN-CNEN/SP CEN Relatório Técnico P&D.CENT.CEN.020.00 RELT.002.00, 2013.

MARTINS, M. O. **Desenvolvimento de sistema computacional para planejamento e controle da manutenção do reator IEA-R1**. 2015. 102 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br> > Acesso em 15 abr. 2016.

MATOS, J. E.; SNELGROVEL, J. L.; **Research Reactor Core Conversion Guidebook, Volume-4: Analytical Verification, IAEA-TECDOC-643**, APPENDIX I-1.1, 1990.

MCADAMS, W. H. *Heat Transmission*, 3rd edition, New York: McGraw-Hill, 1954.

MENZEL, F.; SABUNDJIAN, G.; D'ÁURIA, F.; MADEIRA, A. A. M. BEPU-FSAR: Establishing a Background for Extension of Nuclear Thermal Hydraulic principles to Non-Thermal-Hydraulic codes, In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, Oct. 22-27, 2017, Belo Horizonte, MG, **Proceedings...**, INAC, 2017.

NUSSELT, W. **Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes**. Ver. deutsch. Ing, 60, 1916.

OTTO GANTER, GmbH & Co. KG, **Operating Instruction - Lifting eyebolts - DIN 580**, article n^o. BT-580-V1-09.15, 2015.

PERROTTA, J. A. **Análise do Projeto dos Elementos Combustíveis do Reator IEA-R1 para a operação a 5 MW**. São Paulo: IPEN-CNEN/SP, (Relatório Interno PSI. REN.IEAR1.002, RELT.007.R00), 1997.

POND, R. B.; MATOS J. E., **Nuclear Mass Inventory, Photon Dose Rate and Thermal Decay Heat of Spent Research Reactor Fuel Assemblies (Rev. 1)**. ANL/RERTR/TM-26, Argonne, IL, USA, 1996.

RODRIGUES, G. **Mudança de configuração do núcleo do reator IEA-R1 - Configuração 257 - 4,5 MW** - Grupo de cálculo, CRPq, 28 de julho de 2016.

SALIBA-SILVA, A. M.; CARVALHO, E. F. U.; RIELLA H. G.; DURAZZO, M. Research Reactor Fuel Fabrication to Produce Radioisótopos. In: SINGH, NIRMAL (Ed.). **Radioisotopes - Applications in Physical Sciences**. In Tech, 2011.p.21-54. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/radioisotopes-applications-in-physical-sciences/research-reactor-fuel-fabrication-to-produce-radioisotopes> > Acesso em: 21 set. 2016.

SEDIK, B.; YAVUZ H. Experimental Measurements for Plate Temperatures of MTR Fuel Elements Cooled in Stagnant Air and Comparison with Computed Results, **Kerntechnik**, v. 63, p. 5-6, 1998.

SHAH, M. M. A General Correlation for Heat Transfer during Film Condensation inside Pipes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.22, p. 547-556, 1979.

SHAH, M. M. **Heat Transfer and Fluid Flow Data Books**. Genium Publishing, Section 507.6 page 7, January 1992.

SILVESTRE, L. J. B. **PCRELAP5 – Programa de Cálculo para os dados de entrada do Código RELAP5**, 2016.344 p. (Mestrado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br> > Acesso em 15 abr. 2017.

SUN, K. H.; GONZALES-SANTALO, J. M.; TIEN, C. L. Calculations of Combined Radiation and Convection Heat Transfer in Rod Bundles under Emergency Cooling Conditions, **Journal of Heat Transfer**. v. 98, p. 414-420, 1976.

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY. **Fukushima Nuclear Accident Analysis Report, Jun.** 20th, 2012.

TORRES, W. M. **Projeto de Concepção do Sistema de Resfriamento de Emergência do Reator IEA-RI**. São Paulo: IPEN-CNEN/SP, jun. 1996. (Relatório Interno PSI.RES.CNEN.002, RELT.004.R00).

UMBEHAUN, P. E.; TORRES, W. M.; ANDRADE, D. A. Análise Termo-hidráulica das Placas Externas de um Elemento Combustível Tipo Placa Utilizado no Reator de Pesquisas IEA-R1. In: ENCIT, Nov. 29 –Dec.03, 2004, Rio de Janeiro, RJ. **Proceedings...** 2004.

UMBEHAUN, P. E., ***Desenvolvimento de um Elemento Combustível Instrumentado para o Reator IEA-R1***. 2016. 100 p. Tese. (Doutorado em Tecnologia Nuclear) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>> Acesso em: 14 set. 2016.

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. ***10 CFR 50.46 - Acceptance criteria for emergency core cooling systems for light-water nuclear power reactors***, 1974.

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. ***Three Mile Island: A report to the commissioners and to the public***, v. 1, Washington D.C., 1980.

VALIDYNE. DP15 Variable Reluctance Differential Pressure Sensor, Northridge, CA. Disponível em: < <http://www.validyne.com>>. Acesso em: 28 set. 2017.

WARINNER, D. K.; GLOVER, J. P.; CHEUNG, Y. K. ***Comparison of The Aerospace Systems Test Reactor Loss-of-Coolant Test Data with Predictions of the 3D-AIRLOCA Code***. JAERI M84-073, Argonne National Laboratory, 1984.

WEBSTER, C. C. Water-Loss Tests in Water-Cooled and -Moderated Research Reactors. ***Nuclear Safety***, v. 86, p.590, 1967.

WENZEL, R. O.; ARNOLD, G. P. ***Heat Loss from Fuel Elements Partially Immersed in Water***. Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, Los Alamos, New Mexico, TID-4500, 1970.

WETT, J. F. J. ***Surface Temperatures of Irradiated ORR Fuel Elements Cooled in Stagnant Air***, Oak Ridge National Laboratory report ORNL-2892, April 6, 1960.

YILMAZER, A., YAVUZ, H., Analysis of a Total Loss of Pool Water Accident in MTR-type research reactors. ***Kerntechnik***, v. 69, p. 154-160, 2004.

APÊNDICE A – Detalhes adicionais da seção de testes STAR

Neste Apêndice são fornecidos detalhes adicionais da seção STAR, por meio de desenhos, fotos, tabelas e cálculos.

A.1 – Detalhes adicionais da base da STAR

Na Figura A.1, é fornecido um desenho do palete de alumínio fabricado pela empresa Alutent na sua medida padrão (ALUTENT, 2003). A base foi composta por dois paletes de alumínio sobrepostos, um na medida padrão de 150 mm de altura e outro na medida especial de 175 mm de altura. A Figura A.2 mostra os dois paletes de alumínio da base, que foram colocados um sobre o outro, ainda antes da serem fixados por parafusos, porcas, arruelas e chapas.

Figura A.1 - Paleta de alumínio Alutent na medida padrão

Fonte: ALUTENT, 2003.

Figura A.2 – Dois paletes de alumínio da base da STAR

Fonte: MESQUITA, R. N. 2013²⁴.

Na Figura A.3, é mostrado um desenho esquemático do bloco de chumbo e aço carbono que foi utilizado pela primeira vez por COELHO (1993). Esse bloco já pintado e dentro da caixa envoltória antes do seu fechamento pode ser visto na Figura A.4.

Figura A.3 – Bloco de chumbo e aço carbono – desenho esquemático

Fontes: COELHO, P. R. P. 1993; autor da tese.

²⁴ Comunicação pessoal, fotos da seção de testes STAR fornecidas por MESQUITA, R. N., em 2013.

Figura A.4 – Caixa envoltória de alumínio com bloco de chumbo e aço

Fonte: MESQUITA, R. N., 2013²⁵.

Na Figura A.5, é apresentado um detalhe do bocal de alumínio na base da STAR.

Figura A.5 – Detalhe do bocal de alumínio da base da STAR

Fonte: PRADO, A. C., 2013²⁶.

²⁵ Comunicação pessoal, fotos da seção de testes STAR fornecidas por MESQUITA, R. N., em 2013.

²⁶ Comunicação pessoal, fotos da seção de testes STAR fornecidas por PRADO, A.C., em novembro de 2013.

O mesmo bocal de alumínio com elemento *dummy*, pode ser visto na Figura A.6.

Figura A.6 – Base com detalhe do bocal e do elemento *dummy*

Fonte: PRADO, A. C., 2013²⁷.

Um detalhe da calha dos cabos do ECI é demonstrado na Figura A.7.

Figura A. 7– Detalhe da calha dos cabos do ECI

Fonte: autor da tese.

²⁷ Comunicação pessoal, fotos da seção de testes STAR, fornecidas por PRADO, A.C., em novembro de 2013.

Na Figura A.8, é fornecida a imagem de um olhal de içamento, montado na base da STAR.

Figura A.8 – Detalhe do olhal da base da STAR

Fonte: PRADO, A. C., 2013²⁸.

Na Figura A.9, são apresentadas as informações das dimensões e da carga permitida por olhal. As informações destacadas em vermelho são do olhal M16 que foi o escolhido para a STAR.

Figura A.9 – Olhais de içamento – DIN 580 – dimensões e cargas máximas

Technical drawing of a lifting eye. The front view shows a circular eye with outer diameter d_3 , inner diameter d_4 , and a central hole with diameter d_1 . The height of the eye is h , and the distance from the base to the center of the eye is e . The side view shows the eye with a height of k and a base diameter of d_2 . The distance from the base to the center of the eye is m .

Diagram showing a lifting eye with a vertical force F_1 applied to the center of the eye.

Carga
máxima
axial
por olho

Diagram showing a lifting eye with a force F_2 applied to the center of the eye at a 45° angle to the vertical.

Carga
máxima
por olho
até máx. 45°

d_1	d_2	d_3	d_4	e	h	k
M 8	20	36	20	6	36	8
M 10	25	45	25	8	45	10
M 12	30	54	30	10	53	12
M 16	35	63	35	12	62	14
M 20	40	72	40	14	71	16
M 24	50	90	50	18	90	20
M 30	65	108	60	22	109	24
M 36	75	126	70	26	128	28

d_1	l	m	F_1 in N	F_2 in N
M 8	13	10	1400	1000
M 10	17	12	2300	1700
M 12	20,5	14	3400	2400
M 16	27	16	7000	5000
M 20	30	19	12000	8600
M 24	36	24	18000	12900
M 30	45	28	32000	23000
M 36	54	32	46000	33000

Fontes: OTTO GANTER, 2015; autor da tese.

²⁸ Comunicação pessoal, fotos da seção de testes STAR, fornecidas por PRADO, A.C., em novembro de 2013.

Os resultados dos cálculos dos esforços nos olhais da STAR são demonstrados na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Esforços nos olhais da seção STAR

Carga máxima permitida por olhal - F2	Massa máxima permitida por olhal
(N)	(kg)
5000	510
Seção STAR	
Peso	Massa
(N)	(kg)
5890	601
Peso por olhal	Massa por olhal
(N)	(kg)
1472,5	150,3
Folga por olhal	Folga por olhal
(N)	(kg)
3527,6	360,0

Fontes: OTTO GANTER, 2015; autor da tese.

Para os cálculos, foi utilizada a equação (A.1) que fornece a relação entre a força peso da seção STAR e a sua massa. A força peso é igual à carga solicitada. A carga máxima permitida é o peso máximo permitido por olhal. Para a aceleração da gravidade foi utilizado o valor de $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

$$P_{eSTAR} = m_{STAR} \cdot g \quad (\text{A.1})$$

Onde:

P_{eSTAR} - força peso na seção STAR (N);

m_{STAR} - massa da seção STAR;

O cálculo da massa máxima permitida por olhal é obtido da equação (A.2):

$$m_{m\acute{a}x} = \frac{P_{e m\acute{a}x}}{g} \quad (\text{A.2})$$

Onde:

$m_{m\acute{a}x}$ - massa máxima permitida por olhal (kg);

$P_{e m\acute{a}x}$ - carga máxima ou peso máximo permitido por olhal (N).

No cálculo realizado, o olhal escolhido tem uma massa máxima permitida por olhal de 510 kg. Foi considerada uma massa total na seção STAR de 601 kg, com uma massa por olhal de 150 kg, resultando em uma folga por olhal de 360 kg. Portanto, o olhal DIN 580- M16 foi aprovado para o uso na STAR

Na Figura A.10, é apresentado um desenho esquemático da porca especial de fechamento em aço inox. As porcas de fechamento têm um furo na parte superior por onde entra uma ferramenta especial para o rosqueamento das porcas nos fusos da base de fora da piscina de reator.

Figura A.10 – Porca especial de fechamento

Fonte: autor da tese.

A.2 – Detalhes adicionais do casco da STAR

Neste APÊNDICE, são fornecidos detalhes adicionais do casco da seção STAR.

Nas Figuras A.11 e A12, são apresentadas fotos do casco durante a montagem da seção na piscina do reator IEA-R1.

Figura A.11 – Casco da STAR no dia da montagem na piscina do reator IEA-R1

Fonte: autor da tese.

Figura A.12 – Montagem do casco na piscina do Reator IEA-R1

Fonte: autor da tese.

A.3 – Cálculo da força de empuxo na STAR

Para a realização do experimento com a seção STAR é necessária a condição estabelecida na equação (A.3):

$$E_{STAR} < P_{eSTAR} \quad (A.3)$$

Onde:

E_{STAR} - força de empuxo na seção STAR (N);

P_{eSTAR} - força peso na seção STAR (N).

A força de empuxo na seção STAR é definida pela equação (A.4):

$$E_{STAR} = \sum_{i=1}^n V_{iSTAR} \cdot \rho_a \cdot g \quad (A.4)$$

Onde:

V_{iSTAR} - volume dos componentes da STAR submersos na piscina (m³);

ρ_a - densidade da água da piscina (kg/m³).

Para a aceleração da gravidade foi usado o valor de $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

A força peso na STAR foi calculada pela equação (A.5) que considera a somatória das massas dos componentes submersos na piscina:

$$P_{eSTAR} = \sum_{i=1}^n m_{STAR_i} \cdot g \quad (A.5)$$

Onde:

m_{STAR_i} - massa dos componentes da STAR submersos na piscina (kg);

Na Tabela A.2, são apresentados os componentes da STAR com suas respectivas massas, força peso, volumes, massa de água deslocada e força de empuxo. Na Tabela A.3 são fornecidas as densidades dos materiais usados na Tabela A.2. Na Tabela A.4 é fornecida a diferença entre a força peso e a força de empuxo na STAR.

Tabela A.2 – Verificação da força empuxo na seção STAR

Componentes da STAR	Massa	Peso	Volume	Massa água deslocada	Empuxo
	(kg)	(N)	(m ³)	(kg)	(N)
ECI	5	49	0,0019	1,9	18
Bocal de alumínio	3,4	34	0,0013	1,3	12
Chapa aço carbono	65,0	637	0,0083	8,2	81
Bloco de chumbo	374,9	3674	0,0331	33,0	323
Casco de inox	69,2	678	0,4584	457,5	4484
Parafusos	4,3	42	0,0005	0,5	5
2 vergalhões de alumínio	55,7	546	0,0206	20,6	202
2 Pallets de alumínio	24	235	0,0703	70,1	687
TOTAL	601,5	5894		593,1	5813

Fonte: autor da tese.

Tabela A.3 – Densidades dos materiais da STAR e da água

Material	Densidade
	(kg/m ³)
Aço-inox	8000
Aço	7860
Alumínio	2697
Água	998
Chumbo	11340

Fonte: autor da tese.

Tabela A.4 – Diferença entre a força peso e a força de empuxo na seção STAR

Força peso total na STAR (N)	Força de empuxo total na STAR (N)	Diferença entre as forças peso e de empuxo totais na STAR (N)
5894	5813	81

Fonte: autor da tese.

A partir dos resultados obtidos da diferença entre as forças peso e de empuxo totais na seção STAR, que são apresentados na Tabela A.4, observou-se que existe uma folga de 81 N, que permitiu a realização dos experimentos de esvaziamento e reenchimento da seção de forma segura, sem sua flutuação.

APÊNDICE B – Incertezas esperadas

Neste APÊNDICE, são apresentadas as incertezas esperadas nas medições das temperaturas do ECI e do nível da STAR e do nível da piscina.

As incertezas nas temperaturas do ECI foram consideradas como sendo erros de calibração nas temperaturas do ECI e nos canais do SAD.

Os termopares do ECI foram calibrados no Laboratório do Centro de Radiofarmácia do IPEN/CNEN/SP (UMBEHAUN, 2016). Foram realizadas medidas em sete temperaturas em uma faixa entre 30°C e 150°C. Para cada temperatura foram realizadas duas medições nos termopares, com um total de 14 medições.

Na Tabela B.1, são apresentados os resultados dessa calibração, com as sete faixas de medidas dos valores convencionais (temperatura do forno) e dos valores medidos nos termopares.

As médias das temperaturas do forno, as médias das temperaturas dos termopares do ECI e os erros médios são apresentadas na Tabela B.2. Os erros médios foram determinados pela diferença entre as médias das medidas nos termopares e as médias dos Valores Convencionais (VC).

A calibração da instrumentação e dos canais do Sistema de Aquisição de Dados (SAD) do IEA-R1 foi realizada em outubro de 2016 pela empresa CONTEMP.

No ANEXO 1, são apresentados os resultados da calibração de temperatura e do nível dos canais do SAD que foram utilizados pelos termopares do ECI (CONTEMP, 2016). Também são fornecidos os resultados de calibração do nível dos canais do SADI (CONTEMP, 2016).

Os resultados da calibração dos mesmos canais usados pelos termopares do ECI são apresentados na Tabela B.3. Nessa tabela, foram fornecidas as correspondências entre os termopares do ECI e os canais do SAD. Como simplificação, foram admitidos que os erros totais dos instrumentos mais os canais do SAD, fornecidos no ANEXO 1, como sendo o erro dos canais do SAD.

Tabela B.1 - Calibração dos termopares do ECI

Faixa de temperatura (°C)	30	30	50	50	70	70	90	90	110	110	130	130	150	150
Temperatura do forno VC (°C)	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
Termopar	Medida	Medida	Medida	Medida	Medida	Medida	Medida	Medida	Medida	Medida	Medida	Medida	Medida	Medida
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
TC2	29,5	29,4	50,6	50,5	70,5	70,5	90,7	90,7	111	111,1	131,5	131,5	152,2	152,2
TC3	29,5	29,4	50,6	50,5	70,6	70,6	90,7	90,7	111	111,1	131,6	131,6	152,2	152,2
TC4	29,5	29,4	50,6	50,5	70,5	70,5	90,7	90,7	110,9	111	131,4	131,5	152,1	152
TC5	29,5	29,4	50,6	50,5	70,6	70,5	90,7	90,7	111	111,1	131,5	131,7	152,2	152,2
TC6	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
TC7	29,5	29,4	50,6	50,5	70,6	70,5	90,7	90,7	111	111,2	131,6	131,8	152,3	152,2
TC8	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
TF9	29,5	29,4	50,5	50,5	70,5	70,5	90,7	90,7	110,9	111	131,4	131,6	152,1	152
TC10	29,5	29,5	50,5	50,5	70,6	70,6	90,7	90,7	111	111,1	131,5	131,7	152,2	152,1
TF11	29,4	29,5	50,5	50,5	70,6	70,6	90,7	90,7	111	111,1	131,5	131,6	152,1	152,1
TC12	29,4	29,5	50,5	50,5	70,5	70,6	90,7	90,7	111	111,1	131,5	131,6	152,1	152,1
TF13	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
TF14	29,4	29,5	50,5	50,6	70,5	70,6	90,6	90,6	110,9	111	131,4	131,6	152,1	152
TF15	29,4	29,5	50,5	50,6	70,5	70,6	90,6	90,7	110,9	111	131,4	131,6	152,1	152

Fontes: UMBEHAUN, P. E. 2016, autor da tese.

Tabela B.2 - Médias e erros médios na calibração dos termopares do ECI

Faixa de Temperatura (°C)	30	50	70	90	110	130	150
Média do VC (Forno) (°C)	29,1	50,5	70,4	90,2	110,2	130,1	150,1

Termopar	Media	Erro Médio	Media	Erro Médio	Media	Erro Médio	Media	Erro Médio	Media	Erro Médio	Media	Erro Médio	Media	Erro Médio
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
TC2	29,5	-0,3	50,6	-0,1	70,5	-0,1	90,7	-0,5	111,1	-0,8	131,5	-1,4	152,2	-2,1
TC3	29,5	-0,3	50,6	-0,1	70,6	-0,2	90,7	-0,5	111,1	-0,8	131,6	-1,5	152,2	-2,1
TC4	29,5	-0,3	50,6	-0,1	70,5	-0,1	90,7	-0,5	111,0	-0,8	131,5	-1,3	152,1	-2,0
TC5	29,5	-0,3	50,6	-0,1	70,6	-0,1	90,7	-0,5	111,1	-0,8	131,6	-1,5	152,2	-2,1
TC6	29,5	-0,3	50,6	-0,1	70,5	-0,1	90,8	-0,5	111,0	-0,8	131,6	-1,5	152,1	-2,0
TC7	29,5	-0,3	50,6	-0,1	70,6	-0,1	90,7	-0,5	111,1	-0,9	131,7	-1,6	152,3	-2,2
TC8	29,5	-0,3	50,5	0,0	70,5	-0,1	90,8	-0,5	111,0	-0,8	131,5	-1,4	152,1	-2,0
TF9	29,5	-0,3	50,5	0,0	70,5	-0,1	90,7	-0,5	111,0	-0,8	131,5	-1,4	152,1	-2,0
TC10	29,5	-0,4	50,5	0,0	70,6	-0,2	90,7	-0,5	111,1	-0,8	131,6	-1,5	152,2	-2,0
TF11	29,5	-0,3	50,5	0,0	70,6	-0,2	90,7	-0,5	111,1	-0,8	131,6	-1,5	152,1	-2,0
TC12	29,5	-0,3	50,5	0,0	70,6	-0,1	90,7	-0,5	111,1	-0,8	131,6	-1,5	152,1	-2,0
TF13	29,5	-0,3	50,6	-0,1	70,7	-0,3	90,8	-0,5	111,2	-1,0	131,7	-1,5	152,3	-2,2
TF14	29,5	-0,3	50,6	-0,1	70,6	-0,1	90,6	-0,4	111,0	-0,8	131,5	-1,4	152,1	-2,0
TF15	29,5	-0,3	50,6	-0,1	70,6	-0,1	90,7	-0,5	111,0	-0,8	131,5	-1,4	152,1	-2,0

Fontes: UMBEHAUN, P. E. 2016, autor da tese.

Tabela B.3 - Calibração dos canais e termopares do SAD

Termopar	Média do termopar	Média VC	Erro Médio	Média do termopar	Média VC	Erro Médio	Média do termopar	Média VC	Erro Médio	Média do termopar	Média VC	Erro Médio	Média do termopar	Média VC	Erro Médio	Canal SAD
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	
TC2	20,0	20,4	-0,4	60,0	60,4	-0,4	100,0	100,5	-0,5	140,0	140,6	-0,6	180,0	181	-0,7	T20
TC3	20,0	19,6	0,4	60,0	59,2	0,8	100,0	99,0	1,0	140,0	139,2	0,8	180,0	180	0,4	T21
TC4	20,0	20,1	-0,1	60,0	60,1	-0,1	100,0	100,3	-0,3	140,0	140,3	-0,3	180,0	180	-0,4	T4EI
TC5	20,0	19,6	0,4	60,0	59,8	0,2	100,0	100,0	0,0	140,0	139,8	0,2	180,0	180	-0,2	T5EI
TC6	20,0	20,5	-0,5	60,0	60,5	-0,5	100,0	100,3	-0,3	140,0	140,3	-0,3	180,0	180	-0,4	T6
TC7	20,0	18,7	1,3	60,0	58	2,0	100,0	97	3,0	140,0	136,8	3,2	180,0	176	4,2	T7
TC8	20,0	19,8	0,2	60,0	59,8	0,2	100,0	100	0,0	140,0	139,9	0,1	180,0	180	-0,2	T8
TF9	20,0	20,3	-0,3	60,0	60,3	-0,3	100,0	100,2	-0,2	140,0	140,6	-0,6	180,0	180	-0,4	T9
TC10	20,0	19,8	0,2	60,0	59,8	0,2	100,0	99,8	0,2	140,0	139,6	0,4	180,0	180	0,2	T10
TF11	20,0	19,7	0,3	60,0	59,8	0,2	100,0	99,8	0,2	140,0	139,8	0,2	180,0	180	0,2	T11
TC12	20,0	19,8	0,2	60,0	59,7	0,3	100,0	99,8	0,2	140,0	140	0,0	180,0	180	-0,1	T12
TF13	20,0	20	0,0	60,0	59,9	0,1	100,0	100,2	-0,2	140,0	140,3	-0,3	180,0	180	-0,2	T3EI
TF14	20,0	19,4	0,6	60,0	59,2	0,8	100,0	99,4	0,6	140,0	139,6	0,4	180,0	179	0,7	T14

Fontes: CONTEMP, 2016; UMBEHAUN, P. E., 2016; autor da tese

Na Tabela B.4, são fornecidos os erros totais para o conjunto formado pelos termopares do ECI e pelos canais do SAD. Estes erros totais são considerados como as incertezas.

Tabela B.4 - Erro total ou incertezas dos termopares e canais do ECI no SAD

Termopar	Erro Médio ECI	Erro Médio Canal	Erro Total ou Incerteza ECI+Canal	Canal SAD
	(°C)	(°C)	(°C)	
TC2	-0,8	-0,5	1,3	T20
TC3	-0,8	0,7	1,5	T21
TC4	-0,7	-0,2	1,0	T4_EI
TC5	-0,8	0,1	0,9	T5_EI
TC6	-0,8	-0,4	1,2	T6
TC7	-0,8	2,7	3,6	T7
TC8	-0,7	0,1	0,8	T8
TF9	-0,7	-0,4	1,1	T9
TC10	-0,8	0,2	1,0	T10
TF11	-0,8	0,2	1,0	T11
TC12	-0,8	0,1	0,9	T12
TF13	-0,8	-0,1	1,0	T3_EI
TF14	-0,7	0,6	1,3	T14

Fontes: autor da tese; CONTEMP, 2016; UMBEHAUN, P.E., 2016.

As incertezas para os termopares do ECI ficaram entre 0,8°C e 3,6°C. A incerteza esperada para o termopar TC3 foi de 1,5°C.

A calibração do medidor de nível da piscina do IEA-R1 no SAD é fornecida no ANEXO 1, de onde temos uma incerteza de $\pm 0,01$ m.

O medidor de nível *Valydine* DP15 também foi calibrado pelo Laboratório do Centro de Radiofarmácia do IPEN/CNEN/SP (ABOLAFIO, 2014)²⁹. Esse medidor foi calibrado de 0 a 7000 mm em uma escala de 0 a 10 V, com um multímetro HP34401A, número de série US36049677. A incerteza da precisão esperado no instrumento é de $\pm 0,5\%$ (VALIDYNE, 2017). Essa incerteza já foi indicada nas Tabelas 4.5 e 4.6.

²⁹ Comunicação pessoal, calibração do medidor de nível *Validyne* - VP-15 fornecida por ABOLAFIO, A. em 2014.

APÊNDICE C – Imagens do ECI e da STAR em um dos experimentos

Neste APÊNDICE são fornecidas as fotos da filmagem realizada dentro da piscina do reator, pela equipe do CRPq (SOUZA, 2016)³⁰ e mais uma foto tirada por BELCHIOR (2016)³¹, durante os experimentos do dia 16 de setembro. Os experimentos feitos neste dia foram o PD-1 e o PD-2.

Na Figura C.1 o fundo do núcleo em operação é mostrado à direita e um detalhe da base da seção STAR à esquerda, na plataforma da coluna térmica.

Figura C.1 – Reator em operação e detalhe da base da seção STAR

Fontes: SOUZA, S. P., 2016³⁰, autor da tese.

Nas Figuras C.2 a C.5, pode ser vista a preparação para o experimento PD-1, que teve o seu início às 10h44min25 do dia 16 de setembro de 2016. A retirada do ECI do núcleo e o seu transporte para a seção STAR pode ser vista na Figura C.2.

³⁰ Comunicação pessoal, filmagem do experimento de perda de refrigerante do dia 16 de setembro de 2016 fornecida por SOUZA, S. P., em setembro de 2016.

³¹ Comunicação pessoal, foto do experimento de perda de refrigerante do dia 16 de setembro, fornecida por BELCHIOR Jr., A., em setembro de 2016.

Figura C.2 – Retirada do ECI do núcleo e sua transferência para a STAR

Fontes: SOUZA, S. P., 2016³²; autor da tese.

A colocação do ECI no bocal de alumínio da base da STAR pode ser vista na Figura C.3.

Figura C.3 – Colocação do ECI na base da STAR

Fontes: SOUZA, S. P., 2016³⁰; autor da tese.

A Figura C.4 mostra uma foto tirada por BELCHIOR (2016), com o ECI, já colocado na base da STAR, com o núcleo do IEA-R1 à sua direita.

Na Figura C.5, são visualizadas a colocação do casco sobre a base da STAR e a fixação das porcas de fechamento.

³² Comunicação pessoal, filmagem do experimento de perda de refrigerante do dia 16 de setembro de 2016, fornecida por SOUZA, S. P., em setembro de 2016.

Figura C4 – ECI na STAR e núcleo do IEA-R1

Fonte: BELCHIOR Jr, A., 2016³³.

Figura C.5 – Colocação do casco sobre a base da STAR

Fontes: SOUZA, S. P., 2016³⁴; autor da tese.

Observa-se que, em quase todas as figuras apresentadas há a presença do efeito Cherenkov, que é uma luz azulada emitida pela radiação. Esse efeito foi verificado no núcleo e no ECI, tanto na condição de operação quanto no caso do reator estar desligado. Na condição do reator se encontrar desligado, a existência deste brilho mostra que há calor sendo gerado no núcleo e esse calor de decaimento deve ser retirado por meio da circulação natural da água da piscina.

³³ Comunicação pessoal, foto do experimento de perda de refrigerante do dia 16 de setembro, fornecida por BELCHIOR Jr., A., em setembro de 2016.

³⁴ Comunicação pessoal, filmagem do experimento de perda de refrigerante do dia 16 de setembro de 2016, fornecida por SOUZA, S. P., em setembro de 2016.

APÊNDICE D – Comparação de experimentos de mesmo nível de descobrimento

Neste APÊNDICE são comparados os experimentos de mesmo nível de descobrimento do ECI, mas em diferente condição de calor de decaimento.

Os experimentos envolvidos são os seguintes: o TOT-1 com o TOT-2, o PA-1 com o PA-2, o PB-1 com o PB-2, o PC-1 com o PC-2 e, finalmente, o PD-1 com o PD-2.

D.1- Comparação entre os experimentos TOT-1 e TOT-2

As curvas de calor de decaimento do ECI em kW, estimadas para os experimentos TOT-1 e TOT-2, podem ser visualizadas nas Figuras 4.1 a 4.4 do capítulo 4 desse trabalho. As médias das variações percentuais do calor de decaimento do experimento TOT-2 em relação ao TOT-1 para o transiente total e a condição estacionária de nível constante são de 36% e 35%, respectivamente.

A evolução temporal das temperaturas do termopar TC3 e do nível de descobrimento para os experimentos TOT-1 e TOT-2 são apresentadas na Figura D.1. Como já mencionado anteriormente, o TC3 foi o termopar que apresentou as maiores temperaturas máximas em todos os experimentos.

Na Figura D.1, são mostrados que os níveis de descobrimento dos dois experimentos, TOT-1 e TOT-2, durante a condição estacionária de nível constante, são semelhantes. Os perfis das temperaturas dos dois experimentos mostram um comportamento semelhante, embora o experimento TOT-1 apresente valores de temperaturas bem maiores do que o TOT-2, devido ao seu calor de decaimento ser maior. Na Figura D.1, é observado que há um adiantamento do início da fase de reenchimento do experimento TOT-1, ocasionado pelo menor tempo de duração desse experimento em relação ao TOT-2.

Figura D.1– Evoluções temporais das temperaturas do termopar TC3 e dos níveis de descobrimento dos experimentos TOT-1 e TOT-2

Fonte: autor da tese.

Na Tabela D.1, são apresentadas as comparações das temperaturas máximas dos termopares TC3, TC6 e TC10 e as variações percentuais das temperaturas e do calor de decaimento do experimento TOT-2 em relação ao TOT-1, para as condições de transiente total e estacionária. Nessa tabela, são fornecidas também as relações entre as variações percentuais das temperaturas e as dos calores de decaimento do experimento TOT-2 em relação aos do TOT-1. Na Figura D.2, são fornecidas as variações percentuais do calor de decaimento e das temperaturas, e as relações das variações percentuais da temperatura e do calor de decaimento na condição de transiente total.

Tabela D.1- Comparações das temperaturas máximas e do calor de decaimento dos experimentos TOT-2 e TOT-1

Termopar	TOT-1	TOT-2	Variação Percentual das Temperaturas TOT-2 e TOT-1	Variação Percentual do calor decaimento TOT-2 e TOT-1		Relação das Variações Percentuais da Temperatura e do Calor de Decaimento. TOT-2 e TOT-1	
				Transiente	Estacionária	Transiente	Estacionária
	(°C)	(°C)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
TC3	123,9	101,7	22	36	35	61	62
TC6	115,3	96,7	19	36	35	54	55
TC10	100,8	85,9	17	36	35	48	50

Fonte: autor da tese.

Figura D.2 – Comparações das variações percentuais das temperaturas e do calor de decaimento e das relações dos experimentos TOT-2 e TOT-1 —Transiente total

Fonte: autor da tese.

Por meio da Tabela D.1, observa-se que as temperaturas no experimento TOT-1 são de 17% a 22% maiores do que as do TOT-2, para potências de decaimento superiores de 35% a 36%, respectivamente. As relações entre as variações percentuais das temperaturas e as dos calores de decaimento apontam a influência direta do calor de decaimento sobre a temperatura em cada termopar analisado. Assim, o calor de decaimento teve uma influência direta em torno de 61% sobre as temperaturas do termopar TC3. No entanto, para o TC6 esta influência diminuiu para aproximadamente 54% e, para o TC10 diminuiu um pouco mais, ficando próxima dos 48%.

D.2 - Comparação entre os experimentos PA-1 e PA-2

As médias das variações percentuais do calor de decaimento do experimento PA-2 em relação a PA-1 nas condições de transiente total e estacionária são de 35% e 36%, respectivamente.

Na Figura D.3, são apresentadas as evoluções temporais das temperaturas do termopar TC3 e dos níveis de descobrimento para os experimentos PA-1 e PA-2.

Figura D.3 - Evoluções temporais das temperaturas do termopar TC3 e dos níveis de descobrimento dos experimentos PA-1 e PA-2

Fonte: autor da tese.

Observa-se na Figura D.3, que os níveis de descobrimento dos experimentos PA-1 e PA-2 são bem semelhantes, quando da condição estacionária. Os perfis das temperaturas entre os experimentos PA-1 e PA-2, embora fossem semelhantes, apresentaram diferenças devido ao maior calor de decaimento. Nesse caso observa-se, também, que ocorre um adiantamento do início da fase de reenchimento do experimento PA-1, devido ao tempo de duração desse experimento, quando comparado com o PA-2.

Na Tabela D.2, são mostradas as comparações das temperaturas máximas dos termopares TC3, TC6 e TC10, as variações percentuais das temperaturas e do calor de decaimento entre os experimentos PA-2 e PA-1 e as relações entre estas variações para as duas condições de observação

Na Figura D.4, são apresentadas as comparações das variações percentuais das temperaturas e das relações dos experimentos PA-2 e PA-1, na condição de transiente total.

Tabela D.2– Comparações das temperaturas máximas e do calor de decaimento dos experimentos PA-2 e PA-1

Termopar	PA-1	PA-2	Variação Percentual das Temperaturas PA-2 e PA-1	Variação Percentual do Calor de Decaimento PA-2 e PA-1		Relação das Variações Percentuais da Temperatura e do Calor de Decaimento PA-2 e PA-1	
				Transiente	Estacionário	Transiente.	Estacionário
	(°C)	(°C)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
TC3	122,6	99,4	23	35	36	66	65
TC6	116,7	90,5	29	35	36	83	82
TC10	101,3	82,0	24	35	36	66	66

Fonte: autor da tese.

Figura D.4 – Comparação das variações percentuais das temperaturas e do calor de decaimento e das relações dos experimentos PA-2 e PA-1 – Transiente total

Fonte: autor da tese.

Verifica-se que, para uma elevação no calor de decaimento no PA-1 em relação ao PA-2 de 35% a 36%, tem-se um aumento de 23% a 29% nas temperaturas dos três termopares para o experimento PA-1. Das relações entre as variações percentuais, verificou-se uma influência direta do calor de decaimento de aproximadamente 66% nas temperaturas dos termopares TC3 e TC10. Para o termopar TC6 esta influência foi em torno de 83%.

D.3 - Comparação entre os experimentos PB-1 e PB-2

As médias das variações percentuais dos calores de decaimento do PB-2 em relação ao PB-1 para condições de transiente total e estacionária estão entre 37% e 36%, respectivamente.

As comparações das temperaturas do termopar TC3 e dos níveis de descobrimento para os experimentos PB-1 e PB-2 estão ilustradas na Figura D.5. Nessa figura, verifica-se que há uma boa concordância dos níveis de descobrimento entre os dois experimentos; entretanto, o experimento PB-1 apresenta temperaturas maiores do que as do PB-2.

Figura D.5 – Evoluções temporais das temperaturas do termopar TC3 e dos níveis de descobrimento dos experimentos PB-1 e PB-2

Fonte: autor da tese.

Na Tabela D.3, são apresentadas as comparações das temperaturas máximas dos termopares TC3, TC6 e TC10, as variações percentuais das temperaturas e do calor de decaimento do experimento PB-2 em relação ao PB-1 e a relação das variações percentuais nas condições de transiente total e estacionária.

Tabela D.3 – Comparações das temperaturas máximas e do calor de decaimento dos experimentos PB-2 e PB-1

Termopar	PB-1	PB-2	Variação Percentual das Temperaturas PB-2 e PB-1	Variação Percentual do calor de decaimento PB-2 e PB-1		Relação das Variações Percentuais da Temperatura e do Calor de Decaimento. PB-2 e PB-1	
				Transiente	Estacionária	Transiente	Estacionária
	(°C)	(°C)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
TC3	119,1	95,3	25	37	36	67	70
TC6	108,6	86,9	25	37	36	67	70
TC10	85,9	68,1	26	37	36	70	73

Fonte: autor da tese.

Na Figura D.6, são fornecidas as variações percentuais do calor de decaimento e da temperatura, e as relações das variações percentuais da temperatura e do calor de decaimento, na condição de transiente total.

Figura D.6 – Comparações das variações percentuais das temperaturas e das relações dos experimentos PB-2 e PB-1 – Transiente total

Fonte: autor da tese.

Nas Tabela D.3 e Figura D.6, é observado um aumento quase estável de aproximadamente 25% nas temperaturas dos três termopares para os experimentos PB-1 e PB-2, para calores de decaimento entre 36% e 37% maiores. Por meio das

relações entre as variações percentuais, observa-se uma influência direta do calor de decaimento sobre as temperaturas, praticamente estável, e em torno de 70%, para as temperaturas dos termopares TC3, TC6 e TC10.

D.4 - Comparação entre os experimentos PC-1 e PC-2

As médias das variações percentuais dos calores de decaimento dos experimentos PC-2 em relação ao PC-1 para condições de transiente total e estacionária estão entre 31% e 29%, respectivamente.

As evoluções temporais das temperaturas do termopar TC3 e dos níveis de descobrimento para os experimentos PC-1 e PC-2 são apresentadas na Figura D.7.

Figura D.7 – Evoluções temporais das temperaturas do termopar TC3 e dos níveis de descobrimento dos experimentos PC-1 e PC-2

Fonte: autor da tese.

Como observado nos experimentos anteriores, nesse caso, também, se verifica que os níveis de descobrimento na condição estacionária para os dois experimentos são semelhantes entre si e as temperaturas são mais altas no experimento PC-1 em relação às do PC-2.

A Tabela D.4 fornece as temperaturas máximas dos termopares TC3, TC6 e TC10, as variações percentuais das temperaturas e do calor de decaimento do experimento PC-2 em relação ao PC-1, as relações destas variações, nas duas condições de observação.

Na Figura D.8, são apresentadas as comparações das variações percentuais listadas na Tabela 4.18 para a condição de transiente total.

Tabela D.4 Comparações das temperaturas máximas e do calor de decaimento dos experimentos PC-2 e PC-1

Termopar	PC-1	PC-2	Variação Percentual das Temperaturas PC-2 e PC-1	Variação Percentual do calor decaimento PC-2 e PC-1		Relação das Variações Percentuais da Temperatura e do Calor de Decaimento. PC-2 e PC-1	
				Transiente	Estacionária	Transiente	Estacionária
	(°C)	(°C)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
TC3	97,4	80,9	20	31	29	65	70
TC6	81,69	68,91	19	31	29	59	63
TC10	52,95	46,12	15	31	29	47	50

Fonte: autor da tese.

Figura D.8- Comparações das variações percentuais das temperaturas e das relações dos experimentos PC-2 e PC-1 – Transiente total

Fonte: autor da tese.

Verificou-se um comportamento nos experimentos PC-1 e PC-2, das variações das temperaturas e das relações das variações das temperaturas com as variações do calor de decaimento bastante semelhante ao verificado nos experimentos TOT-1 e TOT-2, conforme Tabela D.4 e Figura D.8. Como já mencionado na seção 4.1, as temperaturas do termopar TC10 foram influenciadas pela água de cobertura no ECI, devido à proximidade do nível dos experimentos PC-1 e PC-2.

D.5 - Comparação entre os experimentos PD-1 e PD-2

As médias das variações percentuais dos calores de decaimento do PD-2 com relação ao PD-1 nas duas condições de observação são apresentadas na Tabela D.5.

Foram estimados valores do calor de decaimento para o experimento PC-1 entre 36% e 38% maiores que os do PC-2.

Na Figura D.9, são mostradas as evoluções temporais das temperaturas do termopar TC3 e dos níveis de descobrimento para os experimentos PD-1 e PD-2.

Figura D.9 – Temperaturas do termopar TC3 e dos níveis de descobrimento dos experimentos PD-1 e PD-2

Fonte: autor da tese.

Os níveis de descobrimento na condição estacionária para os dois experimentos analisados são semelhantes, e as temperaturas mais elevadas são para o experimento PD-1, conforme Figura D.9.

Na Tabela D.5, são listados os resultados das temperaturas máximas dos termopares TC3, TC6 e TC10, as variações percentuais das temperaturas e do calor de decaimento dos experimentos PD-2 e PD-1 e as relações destas variações, nas duas condições de observação. Essas variações apresentadas na Tabela D.5 podem ser visualizadas na Figura D.10, na condição de transiente total.

Tabela D.5– Comparações das temperaturas máximas e do calor de decaimento dos experimentos PD-2 com PD-1

Termopar	PD-1	PD-2	Variação Percentual das Temperaturas PD-2 e PD-1	Variação Percentual do calor decaimento PD-2 e PD-1		Relação das Variações Percentuais da Temperatura e do Calor de Decaimento. PD-2 e PD-1	
				Transiente	Estacionária	Transiente	Estacionária
	(°C)	(°C)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
TC3	87,5	70,9	23	38	36	61	65
TC6	60,0	50,5	19	38	36	50	52
TC10	38,8	36,1	7	38	36	20	21

Fonte: autor da tese.

Figura D.10 – Comparações das variações percentuais das temperaturas e das relações dos experimentos PD-2 e PD-1 – Transiente total

Fonte: autor da tese.

A partir dos resultados da Tabela D.5 e da Figura D.10, verifica-se uma forte influência da água de cobertura sobre as temperaturas do termopar TC10, que estava totalmente inundado durante os experimentos. As relações das variações das temperaturas do termopar TC6 com as variações do calor de decaimento dos experimentos PD-1 e PD-2 tiveram valores menores que as mesmas relações nos experimentos PC-1 e PC-2. Essa diferença pode ser justificada pela proximidade do nível do termopar TC6 aos níveis de descobrimento dos experimentos PD-1 e PD-2, que contribui positivamente no processo de remoção de calor no ECI.

APÊNDICE E – Resultados dos termopares do fluido

Neste APÊNDICE, são apresentadas e comparadas as temperaturas do fluido obtidas dos termopares TF9, TF11 e TF13 dispostos ao longo do ECI.

No APÊNDICE E.1, são comparadas as temperaturas do fluido, medidas pelos termopares TF9, TF11 e TF13, com as temperaturas dos termopares do revestimento nas mesmas posições do ECI.

No APÊNDICE E.2, são comparadas as temperaturas do fluido dos termopares TF9, TF11 e TF13 nos cinco níveis de descobrimento e nas duas condições de calor de decaimento.

E.1– Comparação das temperaturas do fluido e do revestimento

Os termopares que medem as temperaturas do fluido e do revestimento do ECI podem ser vistos na Figura 3.9. Nesse APÊNDICE, são comparadas as temperaturas do fluido e as do revestimento, medidas nas mesmas posições axial e radial do ECI. São comparadas as temperaturas do termopar TC8 com o termopar TF9, do termopar TC10 com o termopar TF11 e do termopar TC12 com o termopar TF13. Essas comparações são mostradas nas Figuras E.1, E.2 e E.3, respectivamente e na Tabela E.1, para o experimento TOT-1.

Figura E.1 – Comparação das temperaturas dos termopares TC8 e TF9 – Experimento TOT-1

Fonte: autor da tese.

Figura E.2 – Comparação das temperaturas dos termopares TC10 e TF11 – Experimento TOT-1

Fonte: autor da tese.

Figura E.3 – Comparação das temperaturas dos termopares TC12 e TF13 – Experimento TOT-1

Fonte: autor da tese.

Tabela E.1 – Comparações das temperaturas dos TC8 e TF9; TC10 e TF11; TC12 e TF13 – Experimento TOT-1

TC8	TF9	Variação Percentual e Diferença TC8 e TF9		TC10	TC11	Variação Percentual e Diferença TC10 e TF11		TC12	TF13	Variação Percentual e Diferença TC12 e TF11	
		(%)	(°C)			(%)	(°C)			(%)	(°C)
93,8	101,3	8	7,5	100,8	85,1	-16	-15,7	93,9	95,55	2%	1,7

Fonte: autor da tese.

Para o melhor entendimento dos resultados da Tabela E.1, salienta-se que da Tabela 3.5 foi obtido o fluxo de calor radial na placa lateral direita, onde estão os termopares TC8 e TF9, que é 28,6% maior que o fluxo das placas centrais, onde estão os termopares TC10 e TF11.

Para a placa lateral esquerda, onde estão os termopares TC12 e o TF13, o fator de potência axial é 24,2% maior que o das placas centrais. Como mencionado na seção 4.1, verifica-se uma eficiente troca de calor radial em todos os níveis do ECI, devido à convecção natural nas placas externas do ECI. Essa remoção de calor radial é maior no nível dos termopares TC8 a TF13.

Dos resultados das Figuras E.1 a E.3 e da Tabela E.1, observa-se que os termopares TC10 e TF11, que estão na placa e no canal central do ECI, apresentam um comportamento normal ao esperado, com temperaturas maiores no termopar do revestimento do que no do fluido.

O termopar TF9 apresenta temperaturas 8% maiores do que o termopar TC8, O termopar TF13 tem temperaturas 2% maiores do que no termopar TC12. Esse comportamento não é normal, mas pode ser atribuído, possivelmente à união dos efeitos da convecção natural nas placas laterais com uma excelente condução de calor nas placas combustíveis. Os valores maiores de temperatura registrados no termopar TF9, quando comparados ao termopar TF13, podem ser justificados, parcialmente, pelos maiores valores de potência radial na placa lateral direita.

E.2– Comparações dos termopares do fluido nos cinco níveis

Neste APÊNDICE são feitas as comparações das temperaturas dos termopares do fluido, TF11, TF9 e TF13, para os cinco níveis de descobrimento do ECI e nas duas condições de calor de decaimento.

Nas Figuras E.4 e E.5, são apresentadas as curvas de temperaturas do termopar TF11 para os experimentos dos grupos 1 e 2, respectivamente. O início e o fim da circulação natural dos experimentos TOT-1/2 também são visualizados nestas duas figuras.

Nas Tabelas E.2 e E.3, são mostradas as comparações das temperaturas máximas dos termopares TF11, TF9 e TF13, para os experimentos dos grupos 1 e 2 respectivamente. Esses três termopares ocupam a mesma posição axial que os termopares TC8, TC10 e TC12, cujos resultados foram apresentados na seção 4.1. A comparação das temperaturas dos termopares TC8, TC10 e TC12 com os termopares TF9, TF11 e TF13, foi abordada no APÊNDICE E.1.

Figura E.4 - Temperaturas do termopar TF11 para os experimentos do Grupo 1

Fonte: autor da tese.

Figura E. 5– Temperaturas do termopar TF11 para os experimentos do Grupo 2

Fonte: autor da tese.

Tabela E. 2– Comparações das máximas temperaturas dos termopares TF9, TF11 e TF13 - Grupo 1

EPR	TF9	Variação Percentual e Diferença TF9 e TF11		TF11	Variação Percentual e Diferença TF11 ((EPRi-2) – (TOT-2))/TOT-2		TF13	Variação Percentual e Diferença TF13 e TF11	
	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(°C)	(%)
TOT-1	101,3	2,5	2,5	98,8	0,0	0,0	95,6	-3,3	-3,2
PA-1	101,8	2,0	2,0	99,8	1,0	1,0	96,6	-3,1	-3,1
PB-1	87,6	0,6	0,5	87,1	-11,9	-11,7	84,6	-2,8	-2,4
PC-1	54,9	-4,0	-2,3	57,2	-42,1	-41,6	54,0	-5,6	-3,2
PD-1	37,1	-8,9	-3,6	40,7	-58,8	-58,1	34,3	-15,8	-6,4

Fonte: autor da tese.

Tabela E. 3- Comparações das máximas temperaturas dos termopares TF9, TF11 e TF13 - Grupo 2

EPR	TF9	Variação Percentual e Diferença TF9 e TF11		TF11	Variação Percentual e Diferença TF11 ((EPRi-2) – (TOT-2))/TOT-2		TF13	Variação Percentual e Diferença TF13 e TF11	
	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)
TOT-2	86,4	1,5	1,3	85,1	0,0	0,0	82,5	-3,1	-2,6
PA-2	82,7	0,7	0,6	82,1	-3,5	-3,0	79,7	-2,9	-2,4
PB-2	69,5	-0,3	-0,2	69,7	-18,1	-15,4	68,1	-2,3	-1,6
PC-2	47,1	-4,8	-2,4	49,5	-41,8	-35,6	46,8	-5,5	-2,7
PD-2	35,1	-6,6	-2,5	37,6	-55,8	-47,5	34,4	-8,5	-3,2

Fonte: autor da tese.

Observa-se por meio dos resultados obtidos, que o comportamento e os valores das temperaturas dos termopares TF9, TF11 e TF13, são semelhantes aos dos termopares TC8, TC10 e TC12. Porém, como já discutido no APÊNDICE E.1, os termopares TF9 e TF13 apresentaram valores maiores que os termopares TC8 e o TC12, possivelmente, devido a uma associação da convecção natural nas placas externas com uma excelente condução de calor nas placas combustíveis.

A maior temperatura registrada nos experimentos do grupo 1, como verificado nos termopares do revestimento deste mesmo nível (TC8, TC10 e TC12), ocorreu no termopar lateral TF9 para o experimento PA-1. O valor máximo no termopar TF9 no PA-1 foi apenas 0,5°C maior que o registrado no TOT-1. No canal central, a máxima temperatura do termopar TF11 foi para o experimento PA-1 e 1,0°C ou 1% maior do que a desse mesmo termopar no experimento TOT-1.

Nos experimentos do grupo 2, o TOT-2 foi o que registrou a maior temperatura nos termopares do fluido, em relação aos demais experimentos, semelhantemente do que ocorreu com os termopares do revestimento. A máxima temperatura, novamente, foi no termopar TF9 que, para o experimento TOT-2 alcançou um valor 3,7°C maior do que no experimento PA-2.

As evoluções temporais da temperatura do termopar TF14, para os experimentos do grupo 1 e 2, respectivamente, são apresentadas nas Figura E.6 e E.7. A Tabela E.4 apresenta as comparações das temperaturas do termopar TF14 para os dez experimentos.

Figura E. 6– Curvas das temperaturas do TF14 nos experimentos do Grupo 1

Fonte: autor da tese.

Figura E. 7– Curvas das temperaturas do TF14 nos experimentos do Grupo 2

Fonte: autor da tese.

Tabela E. 4 – Comparações entre as máximas temperaturas – TF14 – Grupos 1 e 2

EPR	TF14	Variação Percentual e Diferença - TF14 $((EPRI-1) - (TOT-1))/TOT-1$		EPR	TF14	Variação Percentual e Diferença - TF14 $((EPRI-2) - (TOT-2))/TOT-2$	
		(%)	(°C)			(%)	(°C)
TOT-1	64,3	0%	0,0	TOT-2	57,7	0,0	0
PA-1	49,4	-23%	-14,9	PA-2	43,2	-25,1	-14,5
PB-1	40,0	-38%	-24,3	PB-2	36,5	-36,7	-21,2
PC-1	34,8	-46%	-29,6	PC-2	32,5	-43,7	-25,2
PD-1	34,3	-47%	-30,1	PD-2	32,5	-43,7	-25,2

Fonte: autor da tese.

O termopar TF14 está localizado abaixo das placas combustíveis e, portanto, na entrada do ECI. Também, está abaixo do comprimento ativo e do nível dos experimentos PB-1/2, PC-1/2 e PD-1/2. Nos seis experimentos, a temperatura desse termopar foi fortemente influenciada pela água de cobertura. Além disso, nos experimentos PA-1/2 foi observada uma forte redução da temperatura entre 23% e 25% (ou 15°C), em relação aos experimentos TOT1/2. É possível que esta redução nas temperaturas do TF14 esteja ligada à obstrução parcial da entrada de ar nos canais do ECI.

ANEXO 1 – Testes de calibração dos instrumentos e canais do SAD do IEA-R1

Em outubro de 2016, os testes de calibração dos instrumentos e canais do SAD foram realizados pela empresa CONTEMP. Neste ANEXO, são fornecidos os testes dos instrumentos e canais que foram utilizados pelos termopares do ECI na seção STAR e pelo nível da piscina do IEA-R1 (CONTEMP, 2016). Os canais do SAD, com seus respectivos termopares, apresentados nesse ANEXO são indicados na Tabela AN.1.1.

Tabela AN.1. 1 – Canais do SAD usados pelo ECI

Canal do SAD	Termopar
T6	TC6
T7	TC7
T8	TC8
T9	TF9
T10	TC10
T11	TF11
T12	TC12
T14	TF14
T20	TC2
T5_EI	TC5
T21	TC3
T3_EI	TF13
T4_EI	TC4

Fonte: autor da tese.

O Calibrador Microprocessador LCAL-014 foi utilizado em todos os procedimentos de calibração. O método de comparação usou três medidas para cada ponto. Nas figuras a seguir, são apresentados os certificados de calibração da empresa CONTEMP, onde o termo V.C. médio refere-se ao Valor Convencional (de calibração) médio. O erro médio refere-se ao erro médio total do instrumento mais o erro médio do canal do SAD. Foi admitido, como simplificação, que o erro médio total do instrumento mais o erro do canal como sendo o erro médio apenas do canal.

Na Figura AN.1.1, é apresentada a calibração dos canais T6, T7 e T8 e na Figura AN.1.2, a dos canais T9, T10 e T11. Na Figura AN.1.3, é apresentada a calibração do canal T12 e na Figura AN.1.4, a do canal T14. A calibração dos canais T20 e T5_EI é demonstrada na Figura AN.1.5. Na Figura AN.1.6, é apresentada a

calibração do canal T21. Na Figura AN.1.7, é apresentada a calibração dos canais T3_EI e T4_EI do SAD. É importante mencionar que as Figuras AN.1.5 a AN.1.7, aparecem com número de certificado errado, mas com valores corretos.

Figura AN.1.1 – Calibração dos canais T6, T7 e T8 do SAD

Contemp

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

Sistema de gestão da qualidade certificado ISO 9001

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

N° 7421-16

FOLHA 03/11

T6 Saída tanque de decaimento - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO [°C]	V.C. MÉDIO [°C]	ERRO MÉDIO [°C]
20,0	20,5	-0,5
60,0	60,5	-0,5
100,0	100,3	-0,3
140,0	140,3	-0,3
180,0	180,4	-0,4
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

T7 - Saída primária - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO [°C]	V.C. MÉDIO [°C]	ERRO MÉDIO [°C]
20,0	18,7	1,3
60,0	58,0	2,0
100,0	97,0	3,0
140,0	136,8	3,2
180,0	175,8	4,2
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

T8 - Entrada Secundária - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO [°C]	V.C. MÉDIO [°C]	ERRO MÉDIO [°C]
20,0	19,8	0,2
60,0	59,8	0,2
100,0	100,0	0,0
140,0	139,9	0,1
180,0	180,2	-0,2
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

CONTEMP INDUSTRIA COMERCIO E SERVIÇOS LTDA.
Al. Araguaia, 204 - Santa Maria - São Caetano do Sul - SP - PABX: (0xx11) 4223-5100

Figura AN.1.2 – Calibração dos canais T9, T10 e T11 do SAD

Contemp

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

Sistema de gestão da qualidade certificado ISO 9001

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

N° 7421-16

FOLHA 04/11

T9 - Saída secundária - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO (°C)	V.C. MÉDIO (°C)	ERRO MÉDIO (°C)
20,0	20,3	-0,3
60,0	60,3	-0,3
100,0	100,2	-0,2
140,0	140,6	-0,6
180,0	180,4	-0,4
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

T10- Saída primária (Troc. B) - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO (°C)	V.C. MÉDIO (°C)	ERRO MÉDIO (°C)
20,0	19,8	0,2
60,0	59,8	0,2
100,0	99,8	0,2
140,0	139,6	0,4
180,0	179,8	0,2
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

T11 Entrada secundária - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO (°C)	V.C. MÉDIO (°C)	ERRO MÉDIO (°C)
20,0	19,7	0,3
60,0	59,8	0,2
100,0	99,8	0,2
140,0	139,8	0,2
180,0	179,8	0,2
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

CONTEMP INDUSTRIA COMERCIO E SERVIÇOS LTDA.
 Al. Araguaia, 204 - Santa Maria - São Caetano do Sul - SP - PABX: (0xx11)4223-5100

Figura AN.1.3 – Calibração do canal T12 do SAD (ignorar os canais Delta T3 e T13)

Contemp

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

Sistema de gestão da qualidade certificado ISO 9001

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

N° 7421-16

FOLHA 05/11

T12 Saída secundária - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO (°C)	V.C. MÉDIO (°C)	ERRO MÉDIO (°C)
20,0	19,8	0,2
60,0	59,7	0,3
100,0	99,8	0,2
140,0	140,0	0,0
180,0	180,1	-0,1
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

Delta T3 (T12-T11) - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO (°C)	V.C. MÉDIO (°C)	ERRO MÉDIO (°C)
20,0	20,2	-0,2
60,0	60,1	-0,1
100,0	100,0	0,0
140,0	140,1	-0,1
180,0	180,0	0,0
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

T13 - Motor bomba - B101 A - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO (°C)	V.C. MÉDIO (°C)	ERRO MÉDIO (°C)
20,0	19,7	0,3
60,0	59,8	0,2
100,0	99,6	0,4
140,0	139,7	0,3
180,0	179,7	0,3
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

CONTEMP INDUSTRIA COMÉRCIO E SERVIÇOS LTDA.

Al. Araguaia, 204 - Santa Maria - São Caetano do Sul - SP - PABX: (0xx11)4223-5100

Figura AN.1.4 – Calibração do canal T14 do SAD (ignorar canais T15 e T16)

Contemp

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

Sistema de gestão da qualidade certificado ISO 9001

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Nº 7421-16

FOLHA 06/11

T14- Motor bomba - B102 B - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO [°C]	V.C. MÉDIO [°C]	ERRO MÉDIO [°C]
20,0	19,4	0,6
60,0	59,2	0,8
100,0	99,4	0,6
140,0	139,6	0,4
180,0	179,3	0,7
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

T15 - Torre a entrada - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO [°C]	V.C. MÉDIO [°C]	ERRO MÉDIO [°C]
20,0	19,2	0,8
60,0	59,5	0,5
100,0	99,5	0,5
140,0	139,5	0,5
180,0	179,6	0,4
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

T16 - Torre saída - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO [°C]	V.C. MÉDIO [°C]	ERRO MÉDIO [°C]
20,0	19,4	0,6
60,0	59,4	0,6
100,0	99,5	0,5
140,0	139,5	0,5
180,0	179,6	0,4
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

CONTEMP INDÚSTRIA COMÉRCIO E SERVIÇOS LTDA.

Al. Araguaia, 204 - Santa Maria - São Caetano do Sul - SP - PABX: (0xx11) 4223-5100

Figura AN.1.5 – Calibração dos canais T20 e T5_EI do SAD (ignorar canal T2_EI)

Contemp

LABORATÓRIO DE METROLOGIA
Sistema de gestão da qualidade certificado ISO 9001

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO
N° 8431-13

FOLHA 10/11

T2 - EI - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO (°C)	V.C. MÉDIO (°C)	ERRO MÉDIO (°C)
20,0	20,0	0,0
60,0	60,4	-0,4
100,0	100,5	-0,5
140,0	140,6	-0,6
180,0	180,7	-0,7
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

T20 Entrada primária - Trocador A - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO (°C)	V.C. MÉDIO (°C)	ERRO MÉDIO (°C)
20,0	20,4	-0,4
60,0	60,4	-0,4
100,0	100,6	-0,6
140,0	140,8	-0,8
180,0	180,9	-0,9
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

T5 - EI - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO (°C)	V.C. MÉDIO (°C)	ERRO MÉDIO (°C)
20,0	19,6	0,4
60,0	59,8	0,2
100,0	100,0	0,0
140,0	139,8	0,2
180,0	180,2	-0,2
Incerteza °C (±): 0,3	k: 2,11	Veff: 24

CONTEMP INDÚSTRIA COMÉRCIO E SERVIÇOS LTDA.
Al. Araguaia, 204 - Santa Maria - São Caetano do Sul - SP - PABX: (0xx11)4223-5100

Fonte: CONTEMP, 2016.

Figura AN.1.6 – Calibração do canal T21 do SAD (ignorar canais Delta B e Delta A)

Contemp

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

Sistema de gestão da qualidade certificado ISO 9001

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

N° 8431-13

FOLHA 08/11

T21 - Entrada primária trocador B - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO [°C]	V.C. MÉDIO [°C]	ERRO MÉDIO [°C]
20,0	19,6	0,4
60,0	59,2	0,8
100,0	99,0	1,0
140,0	139,2	0,8
180,0	179,6	0,4
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

Delta B [T21-T10] - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO [°C]	V.C. MÉDIO [°C]	ERRO MÉDIO [°C]
20,0	20,0	0,0
60,0	60,1	-0,1
100,0	100,0	0,0
140,0	140,0	0,0
180,0	180,1	-0,1
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

Delta A [T20-T7] - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO [°C]	V.C. MÉDIO [°C]	ERRO MÉDIO [°C]
20,0	20,0	0,0
60,0	60,1	-0,1
100,0	100,0	0,0
140,0	140,1	-0,1
180,0	180,1	-0,1
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

CONTEMP INDÚSTRIA COMÉRCIO E SERVIÇOS LTDA.

Al. Araguaia, 204 - Santa Maria - São Caetano do Sul - SP - PABX: (0xx11)4223-5100

Figura AN.1.7 – Calibração dos canais T3_EI e T4_EI do SAD (ignorar o DeltaT5)

Contemp

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

Sistema de gestão da qualidade certificado ISO 9001

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

N° 8431-13

FOLHA 09/11

T3 - EI - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO (°C)	V.C. MÉDIO (°C)	ERRO MÉDIO (°C)
20,0	20,0	0,0
60,0	59,9	0,1
100,0	100,2	-0,2
140,0	140,3	-0,3
180,0	180,2	-0,2
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

T4 - EI - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO (°C)	V.C. MÉDIO (°C)	ERRO MÉDIO (°C)
20,0	20,1	-0,1
60,0	60,1	-0,1
100,0	100,3	-0,3
140,0	140,3	-0,3
180,0	180,4	-0,4
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

Delta T5 (T17-T18) - Entrada: T - Faixa de indicação 0 a 200°C - Valor de uma divisão: 0,1°C

LEITURA DO INSTRUMENTO (°C)	V.C. MÉDIO (°C)	ERRO MÉDIO (°C)
20,0	20,0	0,0
60,0	60,2	-0,2
100,0	160,2	-60,2
140,0	140,1	-0,1
180,0	180,2	-0,2
Incerteza °C (±): 0,2	k: 2,00	Veff: 1361

CONTEMP INDÚSTRIA COMÉRCIO E SERVIÇOS LTDA.

Al. Araguaia, 204 - Santa Maria - São Caetano do Sul - SP - PABX: (0xx11)4223-5100

Fonte: CONTEMP, 2016.

Na Figura AN.1.8 é fornecido teste de calibração do nível da piscina do IEA-R1, com uma incerteza de $\pm 0,01$ m.

Figura AN.1.8 – Calibração do nível da piscina do IEA-R1

Contemp

LABORATÓRIO DE METROLOGIA
Sistema de gestão da qualidade certificado ISO 9001

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

N° 7423-16

FOLHA 06/11

Condutividade - Piscina entrada resinas 1 - Entrada: 1 a 5 Vdc - Faixa de indicação: 0 a 10 μ s - Valor de uma divisão: 0,01

V.V.C. MÉDIO (μ s)	LEITURA DO INSTRUMENTO (μ s)
1,00	1,02
3,00	3,03
5,00	5,05
7,00	7,06
9,00	9,07

Incerteza μ s ($\pm$): 0,01
k: 2,00
Veff: Infinito

Condutividade da Piscina saída resina - Entrada: 1 a 5 Vdc - Faixa de indicação: 0 a 10 μ s - Valor de uma divisão: 0,01

V.V.C. MÉDIO (μ s)	LEITURA DO INSTRUMENTO (μ s)
1,00	1,02
3,00	3,03
5,00	5,05
7,00	7,06
9,00	9,07

Incerteza μ s ($\pm$): 0,01
k: 2,00
Veff: Infinito

Nível da piscina - Entrada: 1 a 5 Vdc - Faixa de indicação: 0 a 10 m - Valor de uma divisão: 0,01

V.V.C. MÉDIO (m)	LEITURA DO INSTRUMENTO (m)
1,00	1,02
3,00	3,03
5,00	5,03
7,00	7,04
9,00	9,06
10,00	9,06

Incerteza m ($\pm$): 0,01
k: 2,00
Veff: Infinito

CONTEMP INDUSTRIA COMERCIO E SERVIÇOS LTDA.
Al. Araguaia, 204 - Santa Maria - São Caetano do Sul - SP - PABX: (0xx11) 4223-5100

Fonte: CONTEMP, 2016.

ANEXO 2 – Simulação teórica com o código RELAP5

Neste ANEXO, elaborado por SABUNDIJIAN (2017)³⁵, estão descritos o código RELAP5 (IDAHO NATIONAL ENGINEERING LABORATORY, 1999), programa computacional utilizado para simular os experimentos realizados nesse trabalho, e a modelagem da STAR utilizada para a simulação numérica.

AN.2.1 - Código RELAP5

O RELAP5 é um código utilizado mundialmente para a análise de acidentes e transientes em plantas nucleares do tipo *Pressurizer Water Reactor* (PWR), *Boiling Water Reactor* (BWR), reator *CANada Deuterium Uranium* (CANDU) e reatores de pesquisa. Esse programa computacional possui diversas versões que, inicialmente assumiram modelos conservativos e, ultimamente, utilizam a filosofia *best estimate* ou realista.

A versão RELAP5/MOD3.2GAMMA tem sido a mais utilizada na área nuclear no Brasil e no mundo nas últimas décadas para a certificação de reatores nucleares no processo de licenciamento junto aos órgãos licenciadores, pois sua filosofia *best estimate* reduz os custos de projetos, tornando-os mais competitivos comercialmente.

Esse código tem a capacidade de simular Acidentes de Perda de Refrigerante Primário por Pequena ou Grande Ruptura (APRPPR ou APRPGR) em plantas nucleares de pesquisa e de potência. Além disso, pode simular transientes de perda de potência elétrica, perda de água de alimentação, perda de vazão, entre outros. A análise do comportamento termo-hidráulico durante um desses acidentes ou transientes se aplica tanto para o circuito primário como para o secundário de uma instalação nuclear.

³⁵ Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDIJIAN, G. em 2017.

Nos últimos anos, o código RELAP5 também tem sido utilizado para a análise de segurança de reatores de pesquisa, pois os órgãos licenciadores exigem que esse tipo de estudo seja realizado para o licenciamento das instalações.

O processo de licenciamento de uma planta nuclear, tanto de potência como de pesquisa, envolve, não apenas a simulação numérica de acidentes e transientes termo-hidráulicos, mas também a qualificação de sua modelagem, do código utilizado e de seus usuários.

Para a qualificação dos resultados da simulação de acidentes e transientes termo-hidráulicos de uma instalação nuclear com o código RELAP5, há a necessidade da aplicação dos cálculos de sensibilidade e incerteza a fim de validá-los. Na literatura, existem algumas metodologias de cálculo de sensibilidade/incerteza, como: *Best Estimate Plus Uncertainty* – BEPU – desenvolvido pela Universidade de Pisa (D'AURIA et al., 2012), e o *Software for Uncertainty and Sensitivity* – SUSA – desenvolvido pela *Global Research for Safety* (GRS) (KLOSS, 2015).

A modelagem de uma instalação nuclear com o código RELAP5 é feita separadamente para cada um dos componentes do reator, tais como: bombas, tubulações, trocadores de calor, acumuladores, válvulas, entre outros. A maior parte dos componentes é considerada como cilindros e, mesmo que alguns deles apresentem geometrias diferentes, o usuário deverá trabalhar com um diâmetro equivalente ao do cilindro, mantendo o mesmo volume do componente original.

A transferência de calor gerada no interior do núcleo é conduzida pelas estruturas metálicas que constituem a instalação, modeladas como estruturas de troca de calor, e é feita entre a estrutura e o fluido refrigerante.

O modelo hidrodinâmico é baseado em volumes de controle, que podem ser considerados como cilindros com junções de entrada e saída. Propriedades escalares como pressão, energia, densidade e fração de vazio são representadas pela média dentro do volume de controle e estão localizadas no ponto central do mesmo. Por outro lado, propriedades vetoriais, tais como, as velocidades e vazões mássicas, são localizadas nas junções.

O modelo de escoamento do RELAP5 é bifásico, não homogêneo e unidimensional. O modelo de transferência de calor também é baseado numa aproximação unidimensional para o cálculo das temperaturas e fluxos de calor.

O RELAP5 possui seis equações de conservação: de massa, de energia e de quantidade de movimento para cada uma das fases, líquida e vapor. Possui, também, duas equações adicionais, sendo uma para gases não condensáveis e outra para o boro solúvel. O programa conta com uma aproximação da equação de conservação de movimento para fluxo transversal e um modelo de fluxo reverso. Esse último utiliza uma solução de condução bidimensional. O método numérico utilizado nesse código é o de diferenças finitas, tanto na fase líquida como na de vapor.

O primeiro passo para a simulação de um acidente ou transiente com o RELAP5 é a elaboração da nodalização dos componentes hidrodinâmicos da instalação em estudo, que deverão ser modelados por meio da representação geométrica mais próxima da realidade. Alguns componentes existentes no RELAP5 são: PIPE para tubulações, BRANCH para bifurcações ou T's, VALVE para válvulas, ACCUM para acumuladores, PUMP para bombas, SEPARATOR para separadores de vapor, entre outros. Além dos dados geométricos da planta, que fazem parte dos dados de entrada do código RELAP5, também são modelados os sistemas de controle da planta e as estruturas de troca de calor.

A Tabela AN.2.1 apresenta alguns dos componentes mais utilizados em simulações de sistemas com o código RELAP5.

De forma geral, o código RELAP5 necessita das seguintes informações:

- os dados geométricos da instalação;
- os dados dos sistemas de controle, por meio de blocos de controle lógico criados pelo usuário;
- as áreas de transferência de calor, representadas por estruturas de troca de calor entre dois ou mais componentes e também com o meio ambiente;
- a cinética do reator ou a potência da instalação, por meio de tabelas fornecidas pelo usuário;
- os dados dos materiais que constituem a planta, tabelas fornecidas pelo usuário ou pela biblioteca interna ao código.

Tabela AN.2.1 - Elementos mais utilizados em simulações de sistemas com o código RELAP5

Tipo	Componente	Nodalização	Descrição
Volume simples (<i>Single-volume</i>)	SNGLVOL		Representação de algum trecho de tubo sem subdivisão.
Tubulação (<i>pipe</i>)	PIPE		Representação de algum trecho de tubo com divisão.
Conector com várias saídas (<i>branch</i>)	BRANCH		Representa uma tubulação com várias junções conectadas a ela.
Junção Simples (<i>single-junction</i>)	SNGLJUN		Conecta um componente a outro.
Válvula (<i>valve</i>)	VALVE		Pode simular a presença de até seis tipos de válvulas.
Bomba (<i>pump</i>)	PUMP		Simula a presença de uma bomba de refrigeração.
Acumulador (<i>accumulator</i>)	ACCM		Simula os acumuladores de um reator PWR.
Volume dependente do tempo (<i>time dependent volume</i>)	TMDPVOL		Representa um volume com condições de contorno.
Junção dependente do tempo (<i>time dependent junction</i>)	TMDPJUN		Representa junções como condições de contorno.

Fonte: SILVESTRE, L. J. B., 2016.

O código RELAP5 tem a capacidade de identificar quinze regimes de escoamentos, sendo que cada um está associado a um número inteiro, conforme que a Tabela AN.2.2. Esses números são obtidos do arquivo de saída de código de RELAP5 e fornecem o comportamento do fluido para cada volume de controle durante a simulação de um acidente.

Tabela AN.2.2 – Número que corresponde ao regime de escoamento – RELAP5

Regime de Escoamento	Número
<i>High mixing bubbly</i>	1
<i>High mixing bubbly/mist transition</i>	2
<i>High mixing mist</i>	3
<i>Bubbly</i>	4
<i>Slug</i>	5
<i>Annular mist</i>	6
<i>Mist pre-Critical Heat Flow (CHF)</i>	7
<i>Inverted anular</i>	8
<i>Inverted slug</i>	9
<i>Mist</i>	10
<i>Mist post-CHF</i>	11
<i>Horizontal stratified</i>	12
<i>Vertical stratified</i>	13
<i>Level tracking</i>	14
<i>Jet junction</i>	15

Fonte: IDAHO NATIONAL ENGINEERING LABORATORY, 1999.

Na Tabela AN.2.3, são mostrados números inteiros que indicam os modos de transferência de calor e as correlações utilizadas no código do RELAP5 ao longo da execução do problema. Eles podem ser obtidos do arquivo de saída do RELAP5.

Tabela AN.2.3 – Números que correspondem os modos de transferência de calor e correlações usados pelo RELAP5

Número	Modo de Transferência de Calor	Correlação
0	Convecção para mistura de água não condensável	Kays, 1955; Dittus-Boelter, 1930; ESDU, 1973; Shah, 1992, Churchill-Chu, 1975, McAdams, 1954.
1	Convecção de líquido monofásico a pressão supercrítica	Mesmo que o número 0.
2	Convecção de líquido monofásico, parede subresfriada, baixa fração de vazio	Mesmo que o número 0.
3	Ebulição nucleada subresfriada	Chen, 1966.
4	Ebulição nucleada saturada	Mesmo que o número 3.
5	Ebulição transição subresfriada	Chen-Sundaram-Ozkaynak, 1977.
6	Ebulição transição saturada	Mesmo que o número 5.
7	Ebulição filme saturado	Bromley, 1950; Sun-Gonzales-Tien, 1976 e a correlação do número 0.
8	Ebulição filme saturado	Mesmo que o número 7.
9	Convecção de vapor monofásico, ou pressão supercrítica, com a fração de vazio maior do que zero	Mesmo que o número 0.
10	Condensação quando a fração de vazio menor do que um	Nusselt, 1916; Shah, 1979; Colburn-Hougen, 1934.
11	Condensação quando a fração de vazio igual um	Mesmo que o número 10.

Fonte: IDAHO NATIONAL ENGINEERING LABORATORY, 1999.

Se o título mássico do não condensável (com base na massa de gás) for maior do que 10^{-8} , então o valor 20 é adicionado ao número do modo de transferência de calor (coluna um) da Tabela AN.2.3. Assim, o número do modo pode estar entre 20 e 31.

O RELAP5 gera uma grande quantidade de informações da planta, quando da simulação de um transiente ou acidente, e a sua visualização pode ser feita por meio de pós-processadores gráficos como: BELCHIOR (2011) ou APTPLOT (2015).

Existem diferentes opções de cálculo na área de acidentes, combinando a utilização de códigos computacionais e os dados de entrada para fins de licenciamento. Quatro opções podem ser identificadas (FIORI, 2009):

- 1) abordagem muito conservativa, demonstrada no Apêndice K do 10 *Code of Federal Regulations* (CFR) 50.46 (UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1974) para análise no caso *APRPR* ou *APRPGR*;
- 2) abordagem conservativa realista, sendo esta similar à primeira, com exceção ao fato de que são utilizados códigos computacionais *Best Estimate* (BE) ou realistas no lugar de códigos conservativos;
- 3) condições iniciais e de contorno tomadas como realistas, considerando suas incertezas (*Best Estimate Plus Uncertainty* - BEPU);
- 4) abordagem realista, considerando as condições reais de operação da instalação e o uso de códigos BE.

Essas opções encontram-se na Tabela AN.2.4, sendo que a opção 2 será a utilizada neste trabalho.

Tabela AN.2.4 - Opções para combinação de códigos computacionais e dados de entrada

Nº	Opção	Código computacional	Disponibilidade de sistemas	Condições iniciais e de contorno
1	Conservativa	Conservativo	Premissas conservativas	Dados de entrada conservativos
2	Combinada	Realista	Premissas conservativas	Dados de entrada conservativos
3	Realista (BEPU)	Realista	Premissas conservativas	Realista mais incertezas
4	Risco Informado (BEPU estendido)	Realista	Derivada da APS	Dados de entrada realistas mais análise de incertezas

Fonte: MENZEL, F. et al. ,2017.

A seguir, são apresentadas as nodalizações adotadas para a STAR e o ECI.

AN.2.2 - Nodalização da STAR com o RELAP5

Com a finalidade de realizar a análise teórica dos fenômenos termo-hidráulicos que ocorreram nos experimentos realizados com a STAR, foi necessário elaborar uma modelagem para simular o experimento em estudo. Neste trabalho foi utilizado o código computacional RELAP5 versão MOD.3.2.2GAMMA.

As modelagens adotadas para simular os transientes propostos para o experimento STAR, com o código RELAP5 foram detalhadas com a finalidade de descrever adequadamente o fenômeno de circulação natural durante os experimentos propostos. Por esta razão, todos os canais de resfriamento do elemento combustível instrumentado foram modelados, assim como as placas combustíveis e as estruturas metálicas representadas pelas estruturas de troca de calor, conforme Figura AN.2.1. A divisão dos volumes de controle foi feita em nós axiais de forma a centralizar os pontos de medidas experimentais dos termopares conectados às placas combustíveis com os centros dos volumes de controle.

O casco cilíndrico tipo sino de aço-inoxidável, onde o ECI está acomodado, foi modelado de forma a representar o seu esvaziamento total e parcial, e reenchimento, conforme mostrado na Figura AN.2.2.

Observa-se que a modelagem foi feita de forma a representar mais realisticamente o experimento, para que os efeitos de modelagem não interfiram na representação do fenômeno de circulação natural.

Figura AN.2. 1– Modelagem do Elemento Combustível Instrumentado (ECI) – RELAP5

Fonte: SABUNDJIAN, G., 2017³⁶.

³⁶ Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDJIAN, G. em 2017.

Figura AN.2. 2– Modelagem casco cilíndrico em aço-inoxidável – RELAP5

Fonte: SABUNDJIAN, G., 2017³⁷.

Os dados de entrada do RELAP5 para este problema são constituídos pelos componentes descritos na Tabela. AN.2.5, que mostra a correspondência entre os componentes e os volumes de controle adotados nesse trabalho.

³⁷ Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDJIAN, G. em 2017.

Tabela AN.2.5- Correspondência entre os componentes do código/volumes de controle para o ECI

Trecho da planta	Região hidráulica	Nº do componente	Tipo do componente
Elemento	Encaixe ECI	99	SINGLVOL
	Início do ECI	100	SINGLVOL
	Início do ECI		
	Entrada (canais 1,2,3,4,5 e 6)	101	SINGLVOL
	Entrada (canais 7,8,9,10 e 11)	102	BRANCH
	Entrada (canais 12,13,14,15,16 e 17)	103	BRANCH
	Canais dos ECI (1 a 17)	104	BRANCH
	Saídas (canais 1,2,3,4,5 e 6)	1 a 17	PIPE
	Saídas (canais 7,8,9,10 e 11)		
	Saídas (canais 12,13,14,15,16 e 17)	105	BRANCH
	Final do ECI		
Combustível	Corpo do Sino	106	BRANCH
		107	BRANCH
	Parte Superior do Sino		
Instrumentado	Topo do Sino	108	SNGLVOL
	Parte inferior do Sino	200	BRANCH
	Base do Sino	220	BRANCH
	Piscina do Reator (retenção)	230	BRANCH
		240	BRANCH
		250	SNGLVOL
		600	SNGLVOL

Fonte: SABUNDJIAN, G., 2017³⁸.

A seguir, a nodalização do ECI e do sino cilíndrico são descritos detalhadamente:

- três regiões de encaixe do ECI: SNGLVOL 99, SNGLVOL 100 e SNGLVOL 101;

³⁸ Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDJIAN, G. em 2017.

- três regiões de entrada do ECI: BRANCH 102, BRANCH 103 e BRANCH104;
- dezessete canais de resfriamento dos ECI: PIPEs de 1 a 17;
- três regiões de saída do ECI: BRANCH 105, BRANCH 106 e BRANCH 107;
- uma região que finaliza o ECI: SNGLVOL 108.

Na nodalização do sino cilíndrico, foram utilizados os seguintes componentes do código RELAP5:

- para o corpo do sino cilíndrico: PIPE 200, que está subdividido em 16 volumes de controle;
- para a parte superior do sino cilíndrico: BRANCH 220;
- para o topo do sino cilíndrico: PIPE 230, que está subdividido em 3 volumes de controle;
- para a parte inferior do sino cilíndrico: BRANCH 240;
- para a base do sino cilíndrico: SNGLVOL 250;
- para a piscina do reator (retenção): SNGLVOL 600;
- para o esvaziamento do sino: TMDPVOL 603 e TMDPJUN 601;
- para o reenchimento do sino: TMDPVOL 604 e TMDPJUN 605;
- para a parte inferior do sino que está ligada à piscina do reator: junção SNGLJUN 98.

Os dados operacionais adotados como condições iniciais foram obtidos dos experimentos para cada um dos dois cenários estudados com o RELAP5: o de esvaziamento total (TOT-1) e parcial (PD-1). Apenas esses dois resultados serão apresentados e comparados com os experimentais correspondentes, com a finalidade de verificar se o código RELAP5 reproduz adequadamente o fenômeno de circulação natural nas condições de esvaziamento total e parcial da STAR.

Os dados geométricos de cada um dos componentes foram devidamente calculados a partir dos desenhos fornecidos e os dados operacionais foram obtidos do próprio experimento STAR. Os dados materiais foram obtidos da literatura (MATOS; SNELGROVEL, 1990)

A fim de simular o esvaziamento do cilindro que contém o ECI, foi modelada uma junção onde ocorre a perda de água, que representa o sistema de ar comprimido com a velocidade dada pela junção TMDPJUN 601 e, quando do reenchimento do mesmo, pela junção TMDPJUN 605. Como dados de entrada para cada uma dessas junções que são dependentes do tempo, foram fornecidas curvas de tempo *versus* a vazão mássica de esvaziamento e de reenchimento, respectivamente.

Foi utilizada a opção de remolhamento (*Reflood*) que há no código RELAP5 para simular a frente de remolhamento do ECI.

Os resultados de programas que simulam acidentes, como o RELAP5, necessitam de análises adicionais, tais como cálculos de sensibilidade e incertezas das variáveis que constituem os dados de entrada. Para isso, existem *softwares* que realizam este tipo de análise, como o *Software for Uncertainty and Sensitivity Analysis* (SUSA), descrito a seguir.

AN.2.3 - *Software for Uncertainty and Sensitivity Analysis* (SUSA)

O *Software for Uncertainty and Sensitivity Analysis* (SUSA) foi desenvolvido para a análise de sensibilidade e de incertezas na avaliação dos resultados obtidos pelos códigos de análise de acidentes (KLOSS, 2015).

No SUSA, a seleção dos parâmetros que serão avaliados, incertezas/sensibilidade, é feita a partir da avaliação dos resultados obtidos do código de análise de acidentes selecionado pelo usuário. A metodologia proposta pela desenvolvedora do SUSA, a GRS, consiste em um conjunto de técnicas estatísticas. A vantagem de utilizar essas técnicas é que o número de cálculos do código é independente do número de parâmetros de incertezas/sensibilidade. Em cada cálculo do código, todos os parâmetros de incertezas/sensibilidade são variados simultaneamente. A fim de quantificar o efeito destas variações no resultado final, ferramentas estatísticas são utilizadas. Pelo fato do número de cálculos ser independente do número de parâmetros de incertezas/sensibilidade, não há um *ranking* de classificação dos parâmetros de entrada e é necessário que se reduza o seu número para cortar custos de computação. O *ranking* é um dos resultados da análise dos resultados gerados com o código selecionado.

Em resumo, o SUSAS é um programa que executa uma análise estatística de sensibilidade e incertezas dos resultados de códigos de análise de acidentes termo-hidráulicos de reatores nucleares.

AN.2.4 - Resultados obtidos da simulação teórica com o código RELAP5

Neste item do trabalho são apresentadas a comparação teórica e experimental de dois dos experimentos realizados nesse estudo.

Foram simulados teoricamente dois cenários de perda de refrigerante para o experimento STAR, com a potência de decaimento t_1 :

- (1) o esvaziamento total TOT-1;
- (2) o esvaziamento parcial PD-1.

Para cada experimento proposto foram obtidos os seguintes resultados teóricos (RELAP5) /experimentais: as evoluções temporais da temperatura e do nível do termopar TC3. Esse ponto de medida foi o escolhido, pois o TC3 apresentou os maiores valores experimentais de temperatura. A localização desse termopar é na placa de combustível central do ECI, conforme Figura AN.2.1.

Na simulação do esvaziamento total (TOT-1) da STAR com o RELAP5, os resultados obtidos podem ser vistos nas Figuras AN.2.3 a AN.2.8.

Na Figura AN.2.3, são mostradas as curvas de temperatura teórico/experimental do termopar TC3 obtidas para o caso de esvaziamento total da STAR (TOT-1) ao longo de 7000s. Observa-se que os comportamentos de ambas as curvas são semelhantes mas, como esperado, os resultados alcançados com o RELAP5 superaram os experimentais em média de 20°C ($\cong 140^{\circ}\text{C}$).

Devido à circulação natural do ar, essa temperatura tende a diminuir.

Há, também, uma leve subida da temperatura aos 800s devido ao início da circulação natural e outra elevação aos 6000s relativo ao final da circulação natural, comportamento similar ao observado experimentalmente.

Em 6100s ocorre a elevação da temperatura pelo fato que a frente de remolhamento (*Reflood*) diminui a circulação natural do ar na região próxima ao termopar TC3 e, posteriormente, a temperatura começa a diminuir até chegar ao seu valor inicial de 31°C , quando o experimento STAR se encontra preenchido de água, comportamento similar ao observado experimentalmente,

Figura AN.2.3 – Temperatura do termopar TC3 (TOT-1) - RELAP5/experimental

Fontes: SABUNDJIAN, G., 2017³⁹; autor da tese.

Como nos resultados experimentais, as temperaturas do termopar TC3 obtidas com o RELAP5 ficaram bem abaixo da temperatura de empolamento do alumínio (500°C), que é o encamisamento das placas combustível. Os resultados teóricos demonstraram que, mesmo que tenham superado os experimentais, por terem sido consideradas hipóteses conservativas na análise, eles podem ser utilizados para uma avaliação prévia do ECI em caso de esvaziamento total da STAR, conforme Tabela AN.2.4.

Na Figura AN.2.4, são mostrados os resultados teóricos da evolução temporal do nível de líquido, durante o esvaziamento e o reenchimento da STAR, são praticamente coincidentes, demonstrando assim que a simulação numérica reproduziu o experimento TOT-1.

Na Figura AN.2.5, pode ser visto o comportamento temporal da temperatura do fluido no canal de resfriamento conectado ao termopar TC3, canal central do ECI, que apresenta o mesmo perfil da temperatura do termopar, conforme Figura AN.2.3.

³⁹ Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDJIAN, G. em 2017.

Figura AN.2.4 – Nível de fluido no sino (TOT-1) - RELAP5/experimental

Fontes: SABUNDJIAN, G., 2017⁴⁰; autor da tese.

Figura AN.2.5 – Temperatura do fluido no canal conectado ao TC3 (TOT-1) - RELAP5

Fonte: SABUNDJIAN, G., 2017⁴⁰.

A fração de vazio no canal de resfriamento que está conectada ao termopar TC3 atinge o valor 1,0 quando do esvaziamento total dessa seção até o seu reenchimento, comportamento já esperado (Figura AN.2.6).

⁴⁰ Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDJIAN, G. em 2017.

Figura AN.2.6 – Fração de vazio do canal conectado ao TC3 (TOT-1) - RELAP5

Fonte: SABUNDJIAN, G., 2017⁴¹.

Os regimes de escoamento obtidos da simulação com o RELAP5 durante o esvaziamento total e reenchimento da STAR no canal conectado ao termopar TC3 podem ser vistos na Figura AN.2.7. Os regimes de escoamento variam entre: *Bubbly* e *Mist pre-Critical Heat Flow (CHF)*, de acordo com a Tabela AN.2.2.

Figura AN.2.7 – Regime de escoamento do canal conectado ao TC3 (TOT-1) - RELAP5

Fonte: SABUNDJIAN, G., 2017⁴¹.

Na Figura AN.2.8, são apresentados os modelos de transferência de calor adotados pelo código RELAP5 no esvaziamento total e no reenchimento da STAR (TOT-1), que estão devidamente descritos na Tabela AN.2.3, tabela essa acrescida

⁴¹ Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDJIAN, G. em 2017.

de 20 para o gás não condensável e que corresponde ao período de esvaziamento total da STAR.

Figura AN.2.8 – Modo de transferência de calor do canal conectado ao TC3 (TOT-1)/ RELAP5

Fonte: SABUNDJIAN, G., 2017⁴².

No caso do esvaziamento parcial (PD-1) da STAR, os resultados obtidos são apresentados nas Figuras AN.2.9 a AN.2.14. Nesse caso, o ponto de descobrimento parcial encontra-se abaixo do termopar TC3, ficando, portanto, totalmente descoberto durante o esvaziamento.

Na Figura AN.2.9, são apresentados os resultados teórico/experimental do comportamento temporal da temperatura do TC3, semelhantes entre si, sendo que os valores obtidos com o RELAP5 superam os experimentais em 20°C ($\cong 107^{\circ}\text{C}$), durante o período de esvaziamento parcial (PD-1) da STAR. Os valores da temperatura do termopar TC3 obtidos com o RELAP5 foram inferiores aos do esvaziamento total, pelo fato de que a circulação do fluido que se encontra nesse canal contribui para o seu resfriamento, devido a sua circulação natural, seguindo assim, o comportamento experimental.

Nesse caso, as temperaturas atingidas pelo termopar TC3 também foram muito inferiores à temperatura de empolamento do alumínio (500°C), mostrando que os cálculos teóricos podem ser utilizados para uma avaliação preliminar do comportamento do ECI em caso de esvaziamento parcial da STAR.

⁴² Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDJIAN, G., em 2017.

Figura AN.2.9 - Temperatura do termopar TC3 (PD-1) - RELAP5/experimental

Fontes: SABUNDJIAN, G., 2017⁴³; autor da tese.

Os níveis do fluido da STAR obtidos teoricamente e experimentalmente são praticamente coincidentes ao longo de todo o tempo do esvaziamento parcial (Figura AN.2.10). Isso demonstra que a simulação teórica conseguiu reproduzir as condições experimentais de esvaziamento parcial corretamente.

Figura AN.2. 10 – Nível de fluido no sino (PD-1) - RELAP5/experimental

Fontes: SABUNDJIAN, G., 2017⁴³; autor da tese.

⁴³ Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDJIAN, G. em 2017.

Na Figura AN.2.11, pode ser observado que a temperatura do fluido no canal de resfriamento conectado ao termopar TC3 apresenta o mesmo perfil da temperatura do TC3 que está associado a esse canal, conforme Figura AN2.9.

Figura AN.2. 11 – Temperatura do fluido no canal conectado ao TC3 (PD-1) - RELAP5

Fonte: SABUNDJIAN, G., 2017⁴⁴.

A fração de vazio calculada com o RELAP5 para o canal de escoamento conectado ao termopar TC3 vai a 1,0 durante o período de esvaziamento dessa região e volta a zero quando do reenchimento do mesmo, conforme Figura AN.2.12.

Para a mesma região onde foram calculadas as frações de vazio com o RELAP5, obtém-se os regimes de escoamento para esse experimento. Os caminhos de escoamento ficaram entre os regimes *Bubly* e *Mist pre-CHF*, como descrito na Figura AN.2.13.

⁴⁴ Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDJIAN, G., em 2017.

Figura AN.2.12 – Fração de vazio do canal conectado ao TC3 (PD-1) - RELAP5

Fonte: SABUNDJIAN, G., 2017⁴⁵.

Figura AN.2.13 – Regime de escoamento do canal conectado ao TC3 (PD-1) - RELAP5

Fonte: SABUNDJIAN, G., 2017⁴⁵.

⁴⁵ Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDJIAN, G., em 2017.

Os modelos de transferência de calor para o esvaziamento parcial da STAR (PD-1) ao longo de todo o experimento calculados com o RELAP5 são apresentados na Figura AN.2.14. Os modelos adotados estão descritos na Tabela AN.2.3.

Figura AN.2.14 – Modo de transferência de calor do canal conectado ao TC3 (PD-1) RELAP5

Fonte: SABUNDJIAN, G., 2017⁴⁶.

As temperaturas obtidas com o código RELAP5, para o termopar TC3, em ambos os casos estudados, foram muito inferiores à temperatura de empolamento do alumínio, que é de 500°C, mostrando, assim, que os cálculos teóricos podem ser utilizados para uma avaliação preliminar do comportamento do ECI em caso de esvaziamento total e parcial da STAR.

Embora os resultados teóricos obtidos com o RELAP5 apresentem o mesmo comportamento que os experimentais para os dois cenários estudados, esvaziamento total (TOT-1) e parcial (PD-1), existe a possibilidade de aprimorá-los por meio de uma análise de sensibilidade/incertezas com o *software* SUSA. No entanto, essa análise não foi realizada nesse trabalho pelo fato de requerer muitas horas de simulação. Entretanto, esse estudo será realizado em trabalho futuros.

⁴⁶ Simulação teórica com o RELAP5 fornecida por SABUNDJIAN, G. em 2017.