



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR**



**ANÁLISE NUMÉRICA E PROJETO DE EXPERIMENTO EM  
ESCALA DO SISTEMA DA CAMADA DE ÁGUA QUENTE DO  
REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO**

**AUTOR:** FERNANDO LAGE ARAÚJO SCHWEIZER

**ORIENTADORA:** MARIA AUXILIADORA FORTINI VELOSO

**COORIENTADOR:** ANTÔNIO CARLOS LOPES DA COSTA

OUTUBRO DE 2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**ANÁLISE NUMÉRICA E PROJETO DE EXPERIMENTO EM ESCALA  
DO SISTEMA DA CAMADA DE ÁGUA QUENTE DO REATOR  
MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de concentração: Engenharia Nuclear e da Energia

**ORIENTADORA: MARIA AUXILIADORA FORTINI VELOSO**

**COORIENTADOR: ANTÔNIO CARLOS LOPES DA COSTA**

**BELO HORIZONTE**

**ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFMG**

**OUTUBRO DE 2014**

S413a

Schweizer, Fernando Lage Araújo.

Análise numérica e projeto de experimento em escala do sistema da camada de água quente do Reator Multipropósito Brasileiro [manuscrito] / Fernando Lage Araújo Schweizer. – 2014.  
ix, 84 f., enc.: il.

Orientadora: Maria Auxiliadora Fortini veloso.  
Coorientador: Antônio Carlos Lopes da Costa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f.83-84.

1. Engenharia nuclear - Teses. I. Veloso, Maria Auxiliadora Fortini. II. Costa, Antônio Carlos Lopes da. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.039(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES**



## FOLHA DE APROVAÇÃO


**ANÁLISE NUMÉRICA E PROJETO DE EXPERIMENTO EM ESCALA DO SISTEMA DA CAMADA DE ÁGUA QUENTE DO REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO**


**FERNANDO LAGE ARAÚJO SCHWEIZER**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA.

Aprovada em 31 de outubro de 2014, pela banca constituída pelos membros:

  
Profª. Maria Auxiliadora Fortini Veloso - Orientadora  
Departamento de Engenharia Nuclear /UFMG

  
Dr. Antônio Carlos Lopes da Costa – Co-orientador  
CDTN/CNEN

  
Profª. Antonella Lombardi Costa  
Departamento de Engenharia Nuclear /UFMG

  
Dr. Hugo Cesar Rezende  
CDTN/CNEN

Belo Horizonte, 31 de outubro de 2014.

## **AGRADECIMENTOS**

Meus agradecimentos ao laboratório de termo-hidráulica do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) pelo longo período de suporte pessoal e material que culminou na elaboração desta dissertação e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro prestado.

## RESUMO

O Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) consiste em um reator de pesquisa do tipo piscina aberta com 30 MW de potência e está atualmente em seu projeto básico. O RMB tem a finalidade de produzir um fluxo de nêutrons aplicado à irradiação de materiais para a produção de radioisótopos, testes de materiais e combustíveis nucleares. Para proteção contra a radiação emitida pelo reator, este se encontra imerso em uma piscina de água que atua como uma blindagem e proteção térmica. Para reatores de pesquisa de alta potência como o RMB, é utilizado um sistema de filtragem e aquecimento da água no topo da piscina que cria uma camada de água quente (CAQ) estratificada e purificada que evita que a água contaminada da piscina, próxima ao núcleo do reator, atinja a sua superfície, reduzindo a dose de radiação na sala do reator. Nesta dissertação é realizado um estudo do comportamento desta camada durante as primeiras horas de funcionamento do reator, em que perturbações provocadas devido aos circuitos de refrigeração e o aquecimento da piscina provocam uma agitação na CAQ, o que reduz a sua proteção. Simulações numéricas utilizando mecânica dos fluidos computacional foram realizadas para a estimativa da taxa de dose de radiação teórica durante a operação do reator, possibilitando o um prévio dimensionamento e posicionamento dos componentes do sistema, reprodução em escala 1/10 da piscina do reator, aplicando análise adimensional e um teste de malha, como forma inicial de verificação do código comercial Ansys CFX 14.0. Concomitante a etapa de simulação numérica, são definidos equipamentos e sensores necessários ao projeto de uma bancada experimental capaz de validar a aplicação do código comercial pela comparação dos resultados das simulações com valores experimentais.

Palavras-chaves: *Reator Multipropósito Brasileiro (RMB); Camada de Água Quente (CAQ); Mecânica dos fluidos computacional.*

## ABSTRACT

The Brazilian Multipurpose Reactor (RMB) consists in a 30 MW open pool research reactor and its design is currently in development. The RMB is intended to produce a neutron flux applied at material irradiation for radioisotope production and materials and nuclear fuel tests. The reactor is immersed in a deep water pool needed for radiation shielding and thermal protection. A heating and purifying system is applied in research reactors with high thermal power in order to create a Hot Water Layer (HWL) on the pool top preventing that contaminated water from the reactor core neighboring reaches its surface reducing the room radiation dose rate. This dissertation presents a study of the HWL behavior during the reactor operation first hours where perturbations due to the cooling system and pool heating induce a mixing flow in the HWL reducing its protection. Numerical simulations using the *CFD* code CFX 14.0 have been performed for theoretical dose rate estimation during reactor operation, for a 1/10 scaled down model using dimensional analysis and mesh testing as an initial verification of the commercial code application. Equipments and sensor needed for an experimental bench project were defined by the *CFD* numerical simulation.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	IX
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO .....	4
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1. REATORES NUCLEARES. ....	5
2.2. REATORES DE PESQUISA. ....	7
2.3. O REATOR <i>OPAL</i> E O RMB .....	10
2.3.1. SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.....	15
2.3.2. SISTEMA DE CAMADA DE ÁGUA QUENTE.....	19
2.4. ESTUDOS DA CAMADA DE ÁGUA QUENTE EM REATORES DE PESQUISA .....	21
2.5. MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD – <i>COMPUTATIONAL FLUIDS DYNAMICS</i> ).....	26
2.5.1. EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS .....	27
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>31</b>
3.1. DEFINIÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO DO PROTÓTIPO DO RMB... 33	
3.1.1. GEOMETRIA.....	33
3.1.2. MALHA .....	36
3.1.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO. ....	37
3.1.4. DEFINIÇÕES DOS PARÂMETROS NUMÉRICOS DE CÁLCULO. ....	38
3.1.5. MÉTODOS DE ANÁLISE.....	39
3.2. DEFINIÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO EM ESCALA DO PROTÓTIPO DO RMB. ....	43
3.2.1. GEOMETRIA.....	43
3.2.2. MALHA .....	44
3.2.3. ANÁLISE DIMENSIONAL .....	44
3.2.4. DEFINIÇÕES DOS PARÂMETROS NUMÉRICOS DE CÁLCULO. ....	46
3.2.5. MÉTODO DE ANÁLISE .....	46



<b>3.3. DETALHAMENTO DO EXPERIMENTO EM ESCALA .....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.1.PROJETO DO EXPERIMENTO.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.2. INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO.....</b>	<b>51</b>
<b>3.3.3.1. TESTE DA TURBINA.....</b>	<b>53</b>
<b>3.3.3.2. TESTES COM OS TERMOPARES.....</b>	<b>56</b>
<b>3.3.4. DEFINIÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO DO EXPERIMENTO.....</b>	<b>56</b>
<b>3.3.4.1. GEOMETRIA.....</b>	<b>56</b>
<b>3.3.4.2. TESTE DE MALHA.....</b>	<b>58</b>
<b>3.3.4.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO.....</b>	<b>59</b>
<b>3.3.4.4. PARÂMETROS DE CÁLCULO.....</b>	<b>60</b>
<b>3.3.4.5. MÉTODOS DE ANÁLISE.....</b>	<b>60</b>
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>62</b>
<b>4.1. MODELO NUMÉRICO DO PROTÓTIPO DO RMB.....</b>	<b>62</b>
<b>4.2. MODELO NUMÉRICO EM ESCALA DO PROTÓTIPO DO RMB.....</b>	<b>65</b>
<b>4.3. EXPERIMENTO EM ESCALA .....</b>	<b>71</b>
<b>4.3.1. TESTES DOS INSTRUMENTOS APLICADOS AO EXPERIMENTO.....</b>	<b>72</b>
<b>4.3.2. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DO EXPERIMENTO.....</b>	<b>76</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>80</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>83</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Mecanismo de fissão. (Fonte: LAMARSH, 1988) .....	5
Figura 2.2: Concepção básica de um reator. (Fonte: LAMARSH, 1988) .....	7
Figura 2.3: Reator do tipo piscina aberta. (Fonte: ANSTO, 2011) .....	9
Figura 2.4: Reator OPAL. (Fonte: ANSTO, 2011) .....	11
Figura 2.5: Desenho conceitual do RMB, em corte e perspectiva. ....	12
Figura 2.6: Esquema do núcleo do RMB. (Fonte: CNEN, 2010b).....	13
Figura 2.7: Elemento combustível e em detalhe seu corte transversal. (Fonte: SAR 2004).....	14
Figura 2.8: Esquema do tanque de água pesada. (Fonte: ANSTO, 2011).....	15
Figura 2.9: Vista em corte do modelo do RMB. ....	16
Figura 2.10: Vista em corte do circuito do núcleo e da piscina. (Fonte: PSAR, 2001) .....	17
Figura 2.11: Circulação natural no reator. (Fonte: PSAR, 2001).....	18
Figura 2.12: Diagrama dos circuitos de refrigeração do reator. (Fonte: SAR, 2004) .	19
Figura 2.13: Diagrama do circuito da camada de água Quente. (Fonte: NAVARRO, 2010).....	21
Figura 2.14: Gráfico da taxa de dose de radiação e temperatura da piscina do ETRR-2. (Fonte: SHOKR, 2006).....	22
Figura 2.15: Gráfico da taxa de dose de radiação no ETRR-2 ao longo de sua operação. (Fonte: SHOKR, 2006) .....	22
Figura 2.16: Gráfico da atividade e temperatura no HANARO. (Fonte: LEE et al, 1999).....	24
Figura 2.17: Gráfico da radiação no topo da piscina do HANARO. (Fonte: LEE et al, 1999).....	24
Figura 2.18: Domínio contínuo e discreto (Fonte: Maliska, 1998). ....	26
Figura 3.1: Procedimentos para a verificação e validação do Cálculo numérico.....	32
Figura 3.2: Geometria da piscina do protótipo do RMB. ....	34
Figura 3.3: Detalhe da geometria do modelo. ....	35
Figura 3.4: Plano longitudinal e corte da malha para simulação da operação do reator. .....	36

Figura 3.5: Localização dos Volumes 1 e 2 no protótipo do RMB. ....	41
Figura 3.6: Gráfico da transmissão de radiação do Na <sup>24</sup> pela blindagem de água (Fonte: BRITISH STANDARD 4094, 1966) .....	42
Figura 3.7: Disposição das linhas para análise de resultados no protótipo e no modelo reduzido. ....	47
Figura 3.8: Desenho conceitual do tanque do experimento.....	48
Figura 3.9: Principais medidas do tanque do experimento.....	49
Figura 3.10: Fluxograma do experimento da CAQ. ....	50
Figura 3.11: Projeto da sonda de termopares (medidas em mm). ....	53
Figura 3.12. Esquema do experimento de teste e calibração da turbina do circuito da CAQ.....	54
Figura 3.13: Esquema do teste das turbinas do circuito da piscina. ....	55
Figura 3.14: Vista em perspectiva da geometria aplicada no modelo do experimento. .....	57
Figura 3.15: Vista de topo e elevação da geometria aplicada no modelo do experimento. ....	57
Figura 3.16: Vista em corte da malha 2 (intermediária) aplicada na simulação do modelo numérico do experimento. ....	59
Figura 3.17: Linhas aplicadas na análise da temperatura na CAQ do modelo numérico do experimento. ....	61
Figura 4.1: Taxa de dose de radiação teórico na superfície da piscina do RMB. Detalhe dos baixos valores de taxa de dose de radiação no gráfico inferior. ....	62
Figura 4.2: Comparação do comportamento da CAQ entre o modelo em escala reduzida e o protótipo durante a simulação de ligamento do reator. ....	65
Figura 4.3: Comparação do perfil de temperatura da simulação do protótipo e do Modelo em escala reduzida. ....	67
Figura 4.4: Comparação entre o perfil de temperatura do protótipo e do modelo em escala reduzida.....	68
Figura 4.5: Comparação entre o perfil de variação de densidade entre as simulações do protótipo e do modelo em escala reduzida. ....	69
Figura 4.6: Comparação do perfil de velocidade entre a simulação do protótipo e do modelo em escala reduzida.....	70

Figura 4.7: Comparação do perfil do número de Froude entre as simulações do protótipo e do modelo em escala reduzida. ....	71
Figura 4.8: Estado atual da bancada experimental. ....	72
Figura 4.9: Comparação do levantamento da calibração da turbina TVTP com os dados do fabricante. ....	73
Figura 4.10: Comparação entre vazão medidas pelas turbinas SVLT e o medidor por placa de orifício. ....	74
Figura 4.11: Perfil de temperatura obtido pela sonda com 13 termopares. ....	75
Figura 4.12: Gráficos da variação da espessura da CAQ para três malhas distintas. Detalhe da oscilação no período inicial no gráfico inferior. ....	77
Figura 4.13: Gráfico do perfil de temperatura para três malhas distintas. ....	78
Figura 4.14: Comparação entre o perfil de temperatura no centro do tanque, perfil médio e desvio padrão. ....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Condições de contorno aplicadas nos circuitos do RMB. ....	37
Tabela 3.2: Potência de aquecimento. ....	40
Tabela 3.3: Temperatura de formação da CAQ.....	40
Tabela 3.4 Valores de Vazão mássica aplicadas no modelo reduzido. ....	46
Tabela 3.5: Características dos equipamentos empregados no experimento.....	51
Tabela 3.6: Características dos medidores tipo turbina. ....	52
Tabela 3.7: Relação entre corrente e vazão nas turbinas do circuito da Piscina. ....	56
Tabela 3.8: Parâmetros aplicados às malhas do modelo numérico do experimento. ..	58
Tabela 3.9: condições de contorno aplicadas no modelo numérico do experimento. .	60
Tabela 3.10: Variação do passo no tempo e tempo total de simulação. ....	60
Tabela 4.1: Taxa de dose média durante ligamento do RMB. ....	63
Tabela 4.2: Estimativa da dose anual na superfície da piscina do RMB.....	64
Tabela 4.3: Intervalos de análise do escoamento da CAQ. ....	66

# 1. INTRODUÇÃO

É programa de governo e da Comissão Nacional de Energia Nuclear a construção do Reator Multipropósito Brasileiro – RMB que será projetado, construído e operado para atender as atuais necessidades brasileiras na produção de radioisótopos, teste de materiais estruturais e pesquisa na área nuclear (Navarro, 2010).

O RMB terá 30 MW e será do tipo piscina aberta, que é o tipo mais comum e o mais utilizado nos reatores de pesquisa atuais, devido a sua grande versatilidade, facilidade de operação e segurança. Nesta concepção, o reator encontra-se imerso em uma piscina de água leve desmineralizada que garante proteção contra a radiação gerada no núcleo reator, protege o reator contra o superaquecimento e ao mesmo tempo possibilita o seu acesso pelo topo da piscina, permitindo a manipulação do combustível e dos elementos que serão irradiados.

Nesta categoria de reator de pesquisa de potência elevada, é usual a utilização de um circuito de purificação e aquecimento da água no topo da piscina, criando uma camada estratificada que impede que a água próxima ao reator atinja a superfície da piscina, o que poderia resultar na elevação da dose de radiação na sala que abriga o reator. Este é referido como subsistema da Camada de Água Quente (CAQ) da piscina do reator (Navarro, 2010).

No desenvolvimento do projeto do RMB foi tomado como referência o reator australiano *OPAL* (*Open Pool Australian Light-water*). Os dois reatores possuem concepções similares, porém, o RMB apresenta uma potência de 30 MW contra 20 MW do reator *OPAL*, tendo sido necessárias modificações em seu projeto para o reator comportar a maior potência e obter uma concepção que atenda aos propósitos brasileiros (CNEN, 2010a).

Para a sua construção, torna-se necessário um estudo aprofundado de todos os seus componentes e sistemas para o seu correto dimensionamento e definições do projeto. Medições experimentais são proibitivas, nas etapas iniciais do projeto, devido ao seu custo e complexidade. Uma forma alternativa de se realizar estes estudos é por meio da utilização de ferramentas computacionais como o *CFD* (*Computational Fluids Dynamics*).

A mecânica dos fluidos computacional ou simplesmente *CFD* é a análise de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, por meio de simulações em computador. O método resolve as equações termofluidodinâmicas através de um processo numérico, discretizando equações diferenciais em pequenos volumes de controle definidos por uma malha. Neste caso, é utilizado o método de volumes finitos, que aplica a conservação de uma quantidade física expressa pelas equações de transporte nestes pequenos volumes de controle. A metodologia aplicada no *CFD* envolve: geração da geometria e malha do modelo, definição das condições de cálculo, solução das equações discretizadas e análise dos resultados. (Malalasekera, 2007)

O emprego de códigos comerciais de *CFD* para a determinação de parâmetros de projeto deve ser realizado com critério. Existem limitações quanto aos recursos computacionais que limitam a qualidade da discretização espacial do domínio. Devido a esta limitação torna-se necessário o emprego de modelos simplificados para que fenômenos complexos, tais como os de camada limite e turbulência, possam ser levados em consideração na simulação do escoamento. Desta forma, a aplicação de códigos de *CFD* deve ser acompanhada de testes, que verifiquem a influência dos parâmetros numéricos utilizados no código no resultado da simulação, e de experimentos que possibilitem a comparação dos resultados numéricos com os resultados físicos. Estas duas etapas são denominadas Verificação e Validação (Roache, 2009).

No projeto do RMB o Serviço de Tecnologia de Reatores (SETRE) do CDTN é responsável pelo estudo do sistema da Camada de Água Quente (CAQ). O intuito das pesquisas são o de compreender o seu comportamento e determinar um projeto conceitual utilizando uma ferramenta numérica de *CFD* validada por experimentos. Este projeto conta com o apoio do Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da UFMG.

Em um primeiro momento, foram realizadas simulações numéricas *CFD* para a determinação do projeto conceitual da CAQ (Schweizer, 2012). Para realizar as simulações foi criado um modelo em computador de um protótipo do RMB, a partir de dimensões obtidas em referências que detalham a geometria do *OPAL*, alterando algumas características de acordo com definições do projeto brasileiro.

Os resultados obtidos foram úteis para a determinação de diversos parâmetros de projeto, como potência dos aquecedores, posicionamento das injeções e retiradas de água para a CAQ e capacidade de blindagem em diferentes condições de operação do reator (Schweizer, 2012). Os estudos destes parâmetros são importantes para garantir que o sistema da CAQ do reator seja uma proteção radiológica eficaz, permitindo a sua operação a uma taxa de dose de radiação em níveis aceitáveis na sala que o abriga. No entanto, foi observada uma grande dependência dos resultados com os modelos usados e os termos das equações simulados. Desta forma, verificou-se a necessidade da realização de um experimento para a validação deste projeto.



## 1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo a definição e proposição de um experimento em escala a ser reduzido para validação do projeto conceitual da CAQ do RMB. O modelo em escala será definido utilizando simulações de CFD. Esta dissertação abordará uma análise detalhada dos modelos e simulações da Camada de Água Quente e do projeto do dispositivo experimental

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Determinação da geometria e condições de contorno do experimento em escala, com base na análise dimensional dos fenômenos envolvidos no escoamento na piscina e na CAQ;
- Realização de simulação numérica CFD do modelo em escala reduzida, para avaliar se ele é capaz de reproduzir os fenômenos observados na simulação numérica do protótipo do RMB em escala real;
- Análise do comportamento do experimento com base em simulações numéricas da bancada experimental para a determinação da instrumentação necessária, para o monitoramento adequado dos fenômenos necessários à validação das simulações numéricas.
- Teste da instrumentação de medição aplicada à bancada experimental.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Reatores Nucleares

Reatores nucleares de fissão são dispositivos que permitem a geração e controle de uma reação em cadeia de fissão de átomos resultando na produção de calor, nêutrons e de outros elementos, chamados produtos de fissão. Suas aplicações envolvem geração de energia elétrica, propulsão de embarcações, produção de radioisótopos e pesquisa, entre outros.

A fissão nos reatores nucleares ocorre mais comumente utilizando o Urânio 235. A fissão ocorre através da colisão de um nêutron com baixa energia, denominado térmico, com um núcleo de Urânio 235. Ao absorver este nêutron ocorre uma instabilidade no átomo de Urânio que pode se estabilizar liberando radiação eletromagnética gama, ou, com uma probabilidade 5,9 vezes maior, se fissionar, liberando grande quantidade de energia, aproximadamente 200 MeV, e 2,7 nêutrons em média. Estes nêutrons liberados, após serem moderados, podem se chocar com outros átomos de Urânio iniciando uma reação em cadeia (LAMARSH, 1988). A Figura 2.1 representa esta reação.

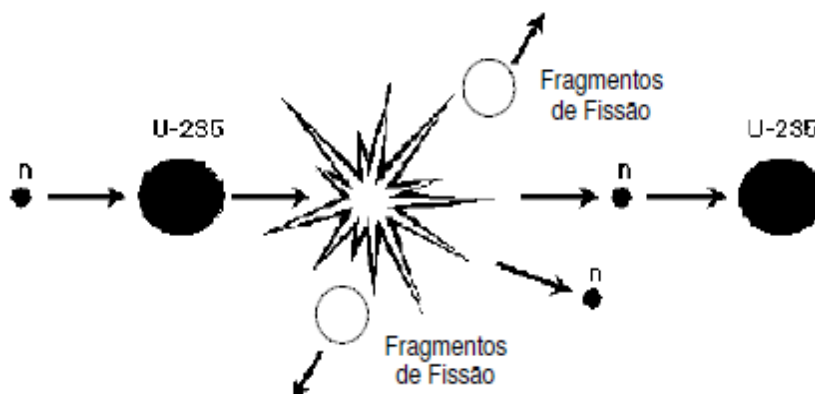


Figura 2.1: Mecanismo de fissão (Fonte: LAMARSH, 1988).

Em reatores nucleares a reação em cadeia é mantida estável, controlando-se o fluxo de nêutrons no interior do núcleo. Para que isso seja possível, os reatores térmicos apresentam elementos básicos conforme apresentado a seguir.

-Núcleo: Composto pelo combustível nuclear e pelo moderador, que tem a função de reduzir a energia dos nêutrons emitidos a um nível adequado à fissão do combustível. Em geral a água leve (H<sub>2</sub>O) é utilizada como moderadora, sendo ela o próprio refrigerante do reator.

- Barras de Controle: São confeccionadas com materiais absorvedores de nêutrons e são inseridas no núcleo do reator, controlando o fluxo de nêutrons, possibilitando o controle do número de fissões do combustível.

-Refrigerante: Circula pelo reator de modo a retirar o calor gerado na reação nuclear.

-Refletor: Situado em volta do núcleo do reator, tem como função refletir os nêutrons emitidos pelo núcleo impedindo que escapem do reator.

-Blindagem: Protege o ambiente externo ao reator da radiação e calor produzido no reator.

A principal aplicação dos reatores nucleares de fissão é a geração de potência. Neste caso é aproveitado o calor gerado pelo núcleo, retirado pelo refrigerante que, por sua vez, alimenta um ciclo térmico convencional. No caso dos reatores de pesquisa, é de interesse o fluxo de nêutrons produzido pelo núcleo, o calor não é aproveitado, sendo descartado ao ambiente pelos sistemas de refrigeração. A Figura 2.2 apresenta uma concepção geral de reator nuclear de fissão.

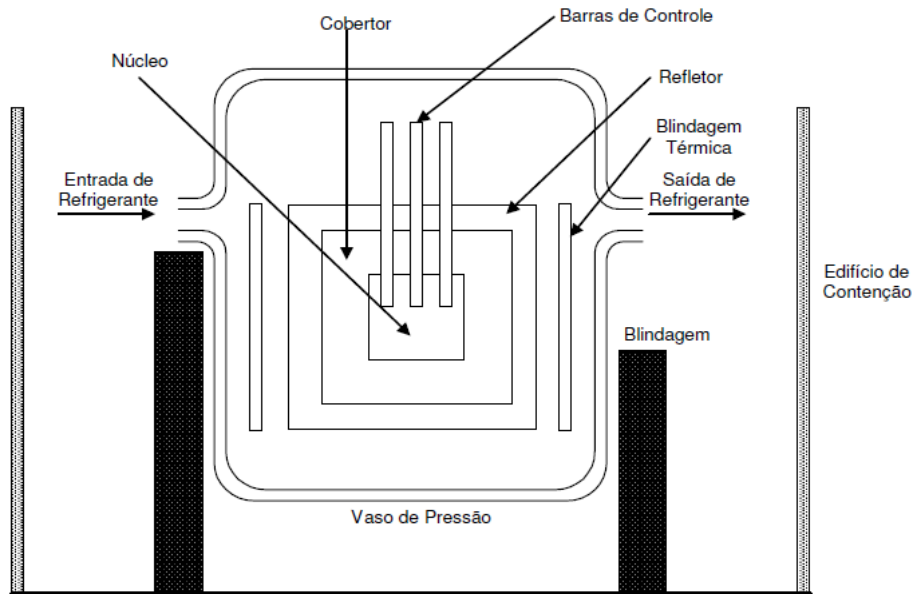


Figura 2.2: Concepção básica de um reator (Fonte: LAMARSH, 1988).

## 2.2. Reatores de Pesquisa

O termo Reator de Pesquisa se aplica a uma ampla gama de reatores nucleares de uso em pesquisa, desenvolvimento, treinamento e produção de radioisótopos. Estes reatores não são utilizados para a produção de energia ou propulsão. Neste termo incluem-se os reatores de potência muito baixa, denominados de potência zero ou conjuntos críticos.

A principal função dos reatores de pesquisa é a de prover uma fonte de nêutrons de multipropósitos com um campo de aplicação amplo na indústria nuclear e não nuclear, como, por exemplo, no desenvolvimento de materiais avançados, aplicações ambientais e na medicina.

Radioisótopos são isótopos instáveis gerados a partir da interação de partículas subatômicas com o átomo. Estes átomos passam a emitir radiação decaindo para um nível estável de energia. A radiação emitida no decaimento pode ser alfa, beta ou gama. A radiação alfa é a emissão de uma partícula composta por dois prótons e dois nêutrons pelo núcleo do átomo, a radiação beta é a emissão pelo núcleo do átomo de uma partícula de mesma massa do elétron podendo ter carga positiva ou negativa e, respectivamente, um

anti-neutrino ou um neutrino. Já a radiação gama consiste na emissão de fótons ou ondas eletromagnéticas, igualmente pelo núcleo do átomo.

Tal propriedade de emissão de radiação dos radioisótopos tem grande aplicação na área industrial, como a realização de ensaios não destrutivos por gamagrafia de peças, verificação do nível de enchimento de lingoteiras em siderúrgicas e na irradiação de alimentos que elimina agentes que os degradam, aumentando seu tempo de prateleira. A irradiação de materiais também pode ser aplicada para melhorar suas propriedades químicas e mecânicas. A emissão de radiação pelos radioisótopos pode ser nociva à saúde, o que torna necessário o confinamento destes elementos por meio de uma blindagem adequada.

Dependendo da aplicação prevista, as características dos reatores de pesquisa podem variar de desenhos simples de reatores homogêneos de potência muito baixa até instalações com alta complexidade como é o caso dos reatores multipropósito. A potência dos reatores de pesquisa pode variar de 0,1 W até 250 MW.

Os reatores de pesquisa são mais simples que os reatores de potência por apresentarem menor potência e assim operarem a temperaturas inferiores a 100 °C e a pressão ambiente. Para obtenção de um alto fluxo de nêutrons, os reatores de pesquisa utilizam um núcleo bem compacto e para isso é necessário o uso de combustível com maior enriquecimento cerca de 20% em massa de Urânio 235 (SAR, 2004) contra 4% nos reatores de potência convencionais.

Os reatores de pesquisa do tipo piscina são construídos imersos em uma piscina profunda que fornece blindagem contra a radiação por meio de uma espessa camada de concreto em suas paredes e pela alta coluna de água até o seu topo. A piscina do reator pode possuir uma abertura denominada canal de transferência que permite o transporte de combustíveis gastos do reator à piscina de serviço, como é caso do reator OPAL e do RMB. A piscina de serviço tem por finalidade o armazenamento dos combustíveis gastos do reator de forma segura, garantido a proteção radiológica e a retirada do calor residual gerado por eles.

Nos reatores em que a ordem de potência é superior a alguns kW, torna-se necessário a utilização de um circuito primário para a refrigeração do núcleo. A Figura 2.3 apresenta um esquema de um reator do tipo piscina aberta.

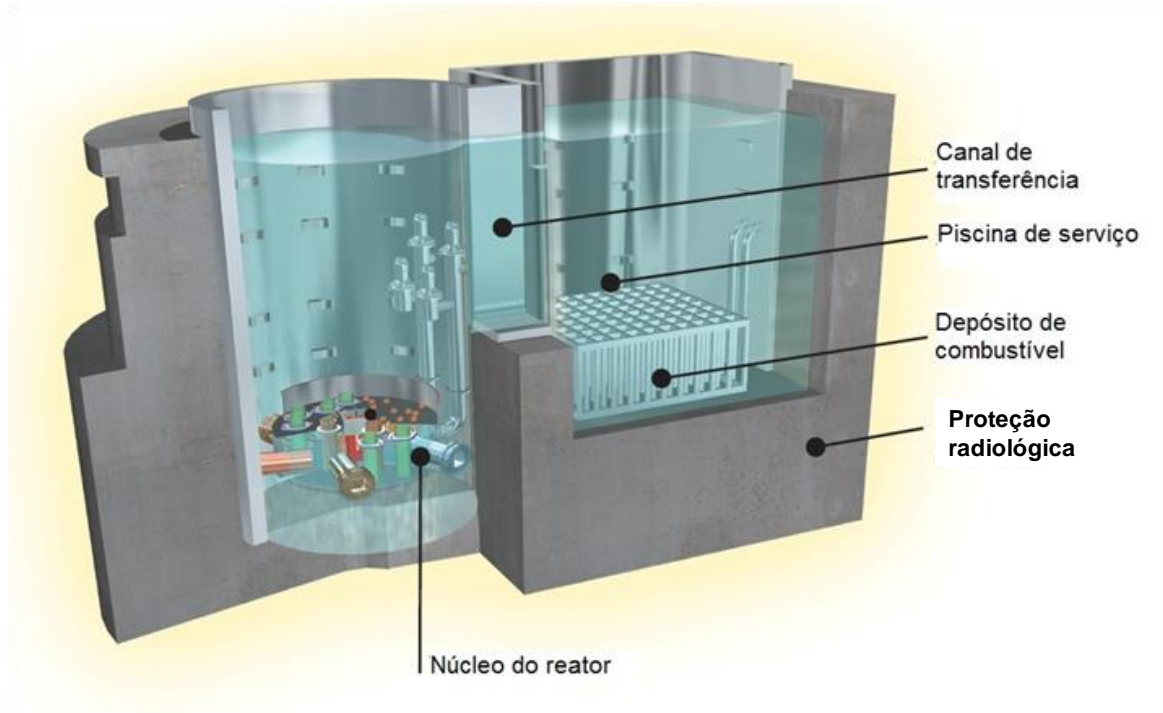


Figura 2.3: Reator do tipo piscina aberta (Fonte: ANSTO, 2011).

Nos reatores de pesquisa, parte dos nêutrons interage com a água da piscina, assim, esta água deve ser desmineralizada e constantemente purificada para evitar que elementos solubilizados sejam irradiados, produzindo radioisótopos que elevam a dose de radiação no topo da piscina. No entanto, em reatores com potência na ordem de MW verifica-se uma dose de radiação elevada no topo da piscina decorrente de radioisótopos presentes na água.

Baptista F. (1995) em seu estudo do reator IEA-R1 verificou que 98% da taxa de dose na superfície da piscina é decorrente de radioisótopos presentes na água e 2% é devido à radiação direta do núcleo do reator. Realizando uma comparação entre 4 reatores de pesquisa distintos: IRL (5MW), Siloé (10 MW), Melusine (4MW) e IEA-R1 (4MW), verificou que os principais elementos que contribuem para a taxa de dose são o  $\text{Na}^{24}$  ( $t_{1/2}=15\text{h}$ ),  $\text{Mg}^{27}$  ( $t_{1/2}=9,46\text{min}$ ) e  $\text{Ar}^{41}$  ( $t_{1/2}=1,83\text{h}$ ), chegando o  $\text{Na}^{24}$  a contribuir com aproximadamente 50% da taxa de dose, sendo 2% do  $\text{Na}^{24}$  resultante da ativação do  $\text{Na}^{23}$  e 98% da reação  $\text{Al}^{27}(n,\alpha)\text{Na}^{24}$ . Outros elementos tais como o  $\text{N}^{16}$  ( $t_{1/2}=7,13\text{s}$ ), resultante da

reação  $O^{16}(n,p)N^{16}$ , contribuem de forma insignificante na taxa de dose da piscina se comparados ao  $Na^{24}$ .

Shokr (2006) realizou um estudo da taxa de dose na superfície da piscina do reator egípcio ETRR-2, que mostrou que o radioisótopo que mais contribui no nível de radiação no topo da piscina é o  $Na^{24}$  devido a sua meia-vida maior em relação aos outros radionuclídeos presentes.

### **2.3. O reator *OPAL* e o RMB**

O reator *OPAL* (*Open Pool Australian Light-water*) ou “reator australiano de piscina aberta de água leve”, inaugurado em 2007, é um reator multipropósito do tipo piscina aberta com uma potência nominal de 20 MW e é utilizado pela “*Australian Nuclear Science and Technology Organisation*” (*ANSTO*) como fonte de nêutrons no desenvolvimento de pesquisa na área nuclear, irradiação de materiais e principalmente na produção de radioisótopos (SAR, 2004). As características deste reator foram obtidas a partir de relatórios de análise de segurança SAR (2004) e PSAR (2001) elaborados pela empresa argentina *INVAP* que desenvolveu o projeto e construiu o reator. A Figura 2.4 apresenta uma vista de topo da piscina do reator.

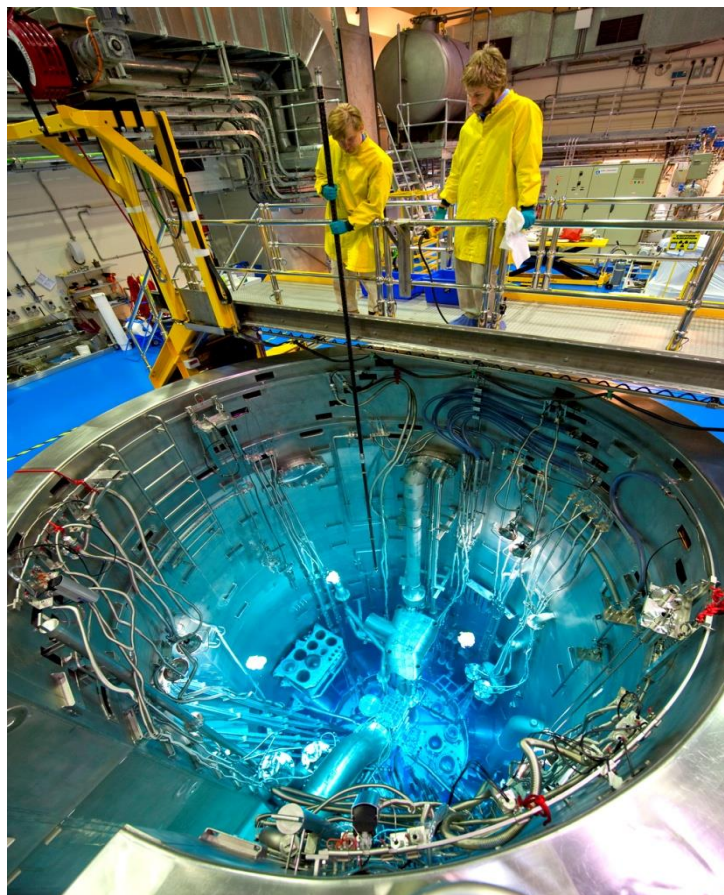


Figura 2.4: Reator *OPAL* (Fonte: ANSTO, 2011).

O RMB apresentará características semelhantes ao reator *OPAL* se diferenciando do ponto de vista termo-hidráulico, pela sua maior potência e tamanho da piscina.

A Figura 2.5 apresenta um desenho conceitual das estruturas principais do RMB detalhando o posicionamento de seus componentes. A chaminé conecta o *Plenum* inferior à tubulação de saída de água localizada em sua lateral. Em sua parte superior há uma abertura que dá acesso ao núcleo pela piscina, possibilitando a manipulação e visualização dos elementos combustíveis. Dentro da chaminé, em sua parte inferior, está localizado o núcleo do reator.



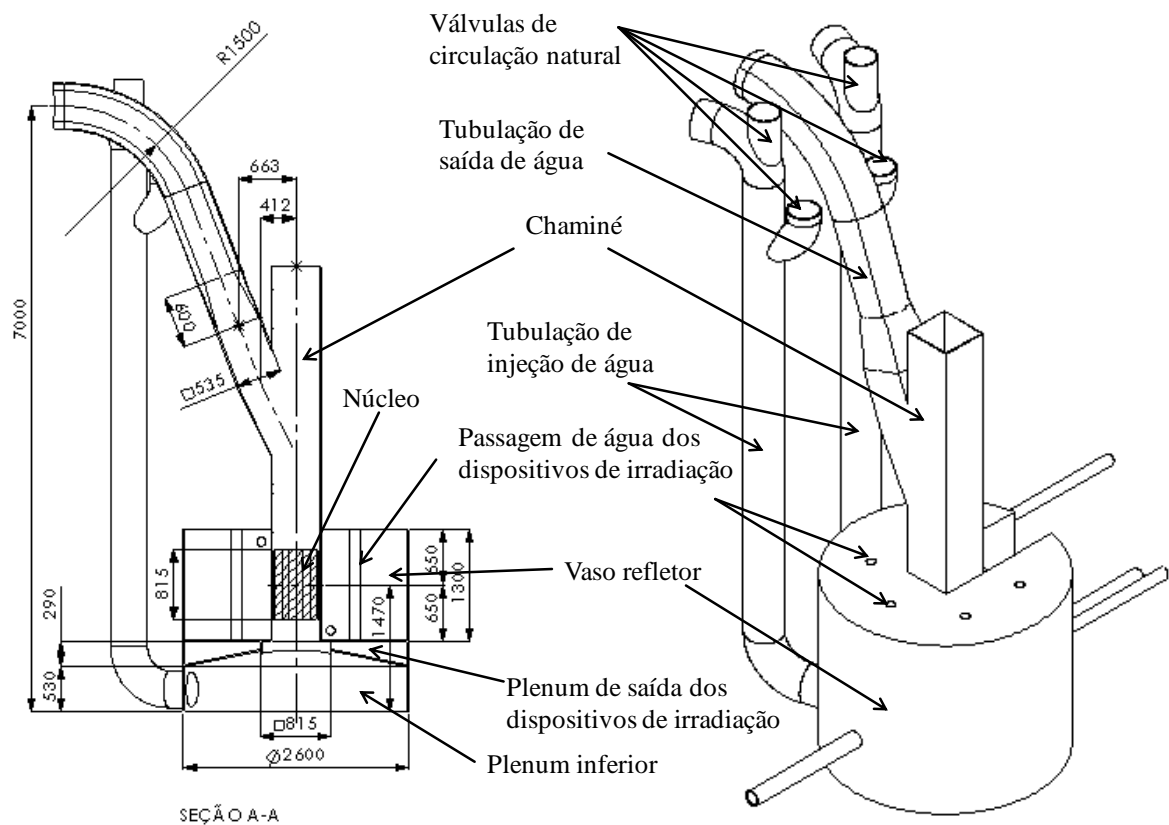


Figura 2.5: Desenho conceitual do RMB, em corte e perspectiva.

A água que passa pelo núcleo tem função refrigerante e moderadora de nêutrons. Em torno do núcleo, há o tanque de água pesada por onde passam as tubulações para refrigeração dos dispositivos de irradiação aí instalados. Toda esta estrutura mostrada na Figura 2.5 é inserida na piscina do reator para realizar a blindagem das radiações.

O projeto atual do RMB consiste em um núcleo com disposição de 5 x 5 dos seus elementos, sendo 24 combustíveis, uma posição de irradiação com as mesmas dimensões dos elementos combustíveis e seis barras de controles paralelas, como observado na Figura 2.6.

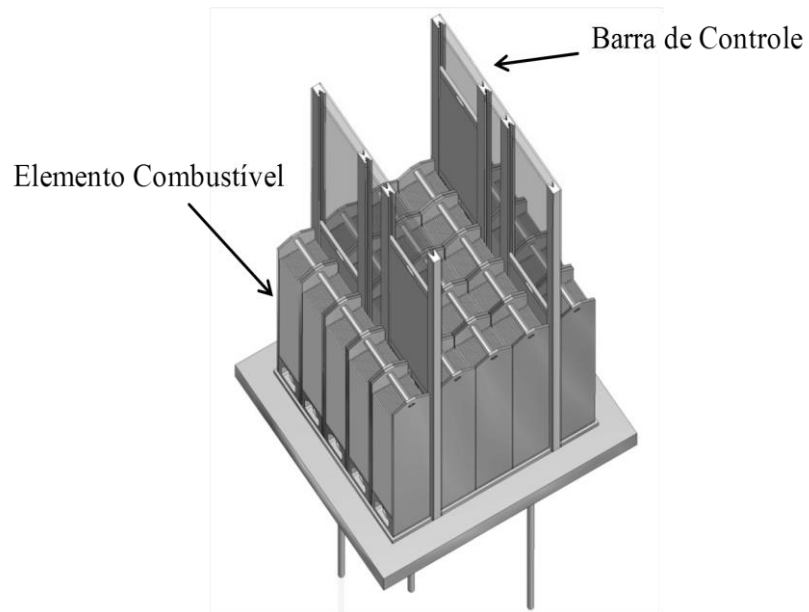


Figura 2.6: Esquema do núcleo do RMB (Fonte: CNEN, 2010b).

O elemento combustível é composto por 21 finas placas de  $U_3Si_2$  enriquecidas a 19,75% em massa de  $U^{235}$ , revestidas por uma lâmina de alumínio e presas a uma estrutura externa, como apresentado na Figura 2.7.

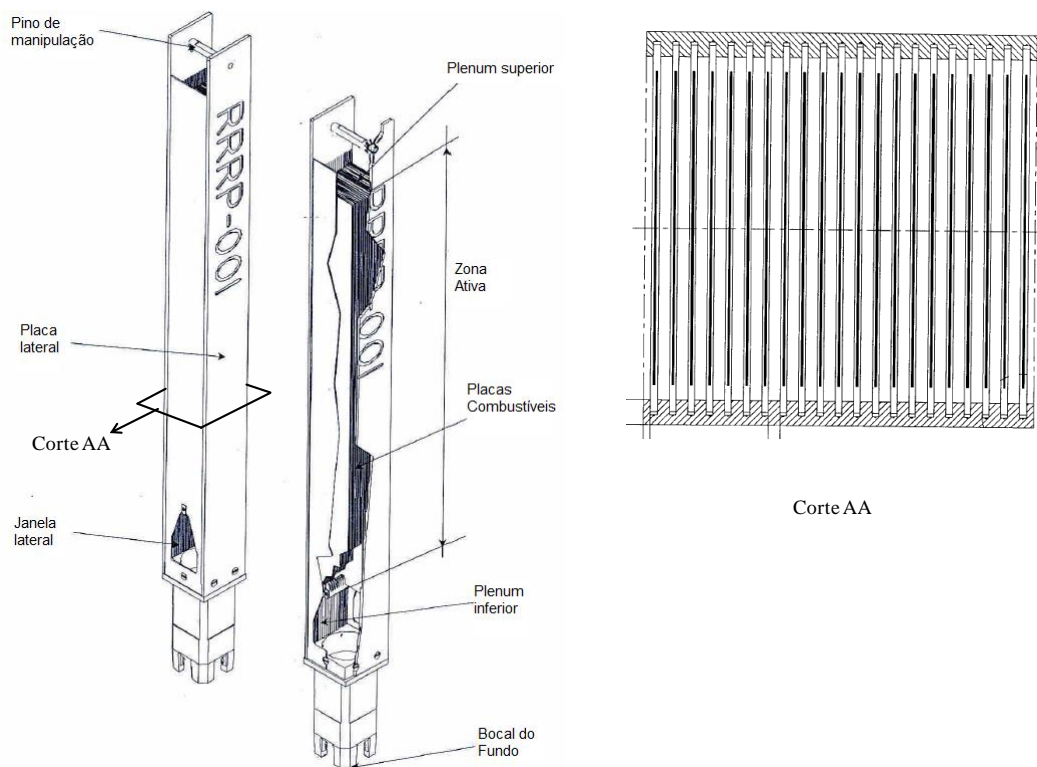


Figura 2.7: Vista em perspectiva e seu corte transversal do Elemento combustível  
(Fonte: SAR 2004).

O tanque de água pesada ( $D_2O$ ) ou vaso refletor é uma estrutura estanque e tem a função de refletir os nêutrons gerados na fissão mantendo a reação em cadeia do reator, onde a água de deutério ( $D_2O$ ) possui boa capacidade de reflexão e moderação dos nêutrons. Este tanque pode ser usado para desligar o reator, através da remoção da água pesada do tanque pela injeção de hélio em seu interior (SAR 2004). Outra função do vaso refletor é a acomodação dos dispositivos de irradiação e a captação dos feixes de nêutron. A moderação de nêutrons no interior do vaso produz calor na ordem de 6% da potência nominal do reator. Devido a este calor gerado, há um sistema para a refrigeração e purificação da água pesada. A Figura 2.8 apresenta o esquema das instalações no vaso refletor.

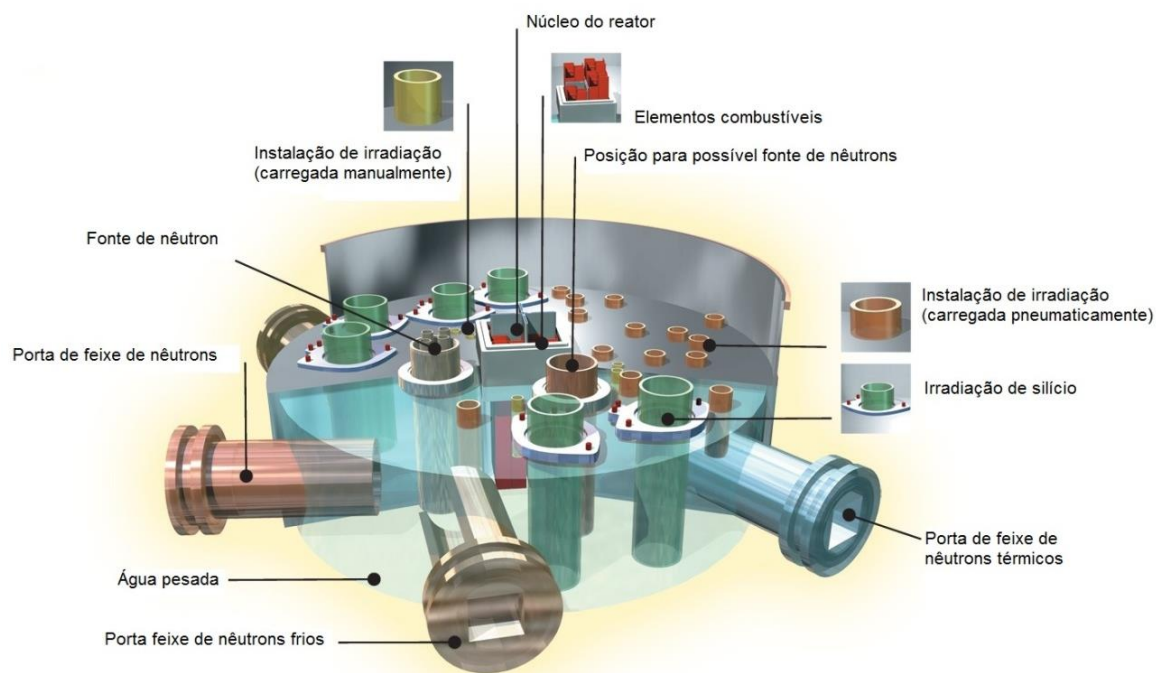


Figura 2.8: Esquema do tanque de água pesada (Fonte: ANSTO, 2011).

No caso do projeto do RMB, em umas das laterais do núcleo, é inserida uma placa de berílio para reflexão de nêutrons, para a realização de ensaios de combustíveis, limitando o tanque de água pesada a apenas três quartos restantes do núcleo.

### 2.3.1. Sistemas de refrigeração

Devido à grande potência térmica do reator, é necessária a refrigeração forçada de seus elementos combustíveis, o que é realizado pelo circuito primário de refrigeração. A vazão de água deve garantir a integridade térmica do combustível e não provocar vibração e arraste das placas combustíveis.

Neste circuito a água entra por duas tubulações no *Plenum* inferior do reator, sendo direcionada aos elementos combustíveis pelos bocais em sua parte inferior passando por entre as placas de combustível, retirando calor e atuando como moderador. Para sair do núcleo, a água passa por uma tubulação lateral da chaminé, sendo direcionada aos sistemas de purificação e trocadores de calor externos à sala do reator. A Figura 2.9 apresenta uma vista em corte do reator e a circulação de água do circuito primário.

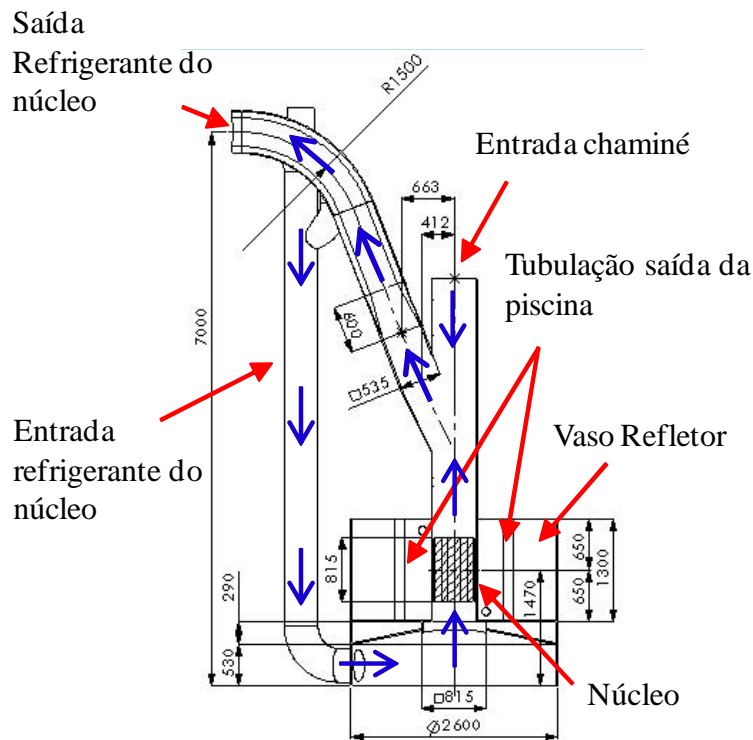


Figura 2.9: Vista em corte do modelo do RMB.

Outro sistema presente no reator é o de refrigeração da piscina composto por um distribuidor toroidal que injeta água na base da piscina e por um *Plenum* abaixo do vaso refletor que recolhe a água da piscina. Este circuito tem o objetivo de regular a temperatura da piscina, purificá-la e refrigerar os dispositivos de irradiação, transportando a água contaminada para tanques de decaimento. Outra função deste circuito é remover o calor gerado pelos combustíveis armazenados na piscina de serviço.

Para evitar que a água do circuito primário de refrigeração vá para piscina pela abertura no topo da chaminé, é induzida uma vazão descendente da piscina na ordem de 10% do valor da vazão total do circuito. A água que entra pela chaminé se mistura a água do circuito primário de refrigeração e sai pela tubulação lateral. Esta vazão é induzida através de um sistema de interconexão, que conecta o circuito primário de refrigeração do reator com o circuito de refrigeração da piscina. Este sistema desvia 10% da vazão do circuito primário do núcleo que após passar pelos trocadores de calor é injetada na parte inferior da piscina. Este sistema de interconexão garante o balanço de massa entre os dois circuitos sem causar o esvaziamento da piscina. A Figura 2.10 apresenta esta distribuição de vazões no reator.

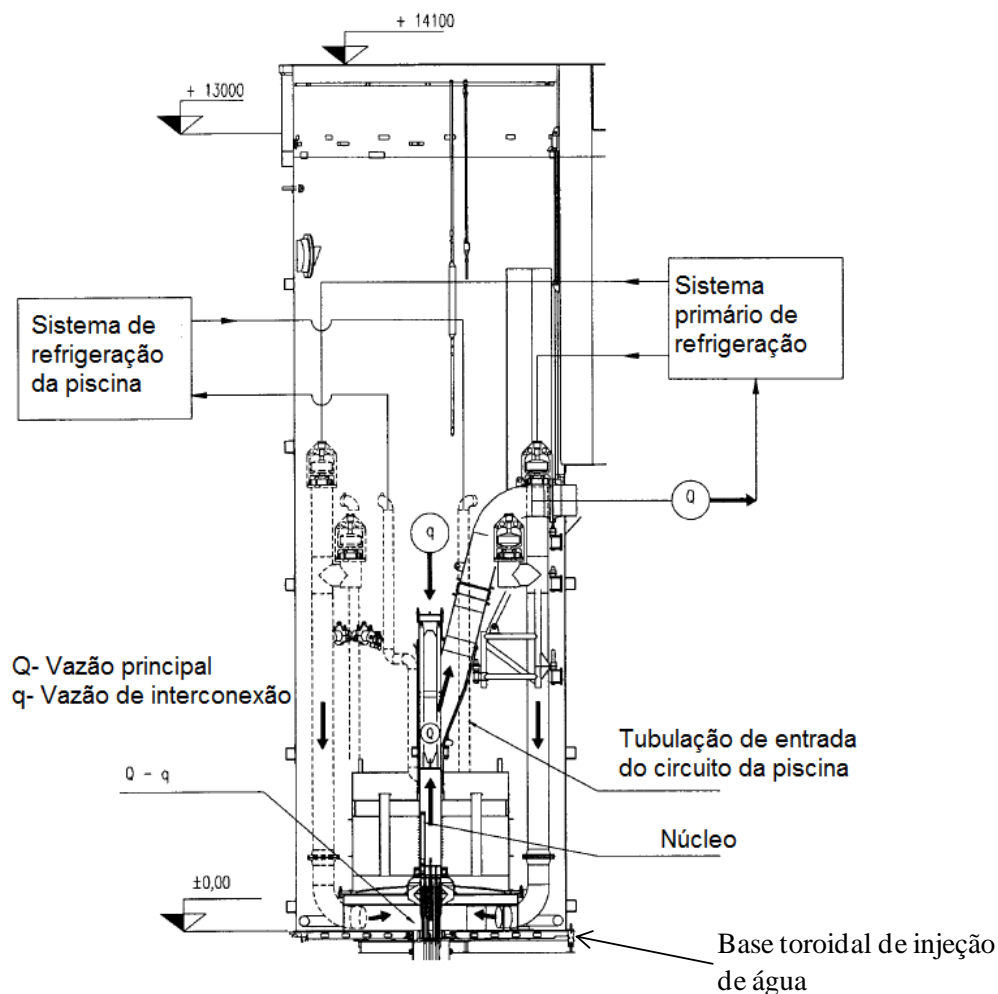


Figura 2.10: Vista em corte do circuito do núcleo e da piscina (Fonte: PSAR, 2001).

Nas tubulações de entrada do circuito primário de refrigeração, estão presentes válvulas de circulação natural. Em caso de parada do circuito de refrigeração o reator é imediatamente desligado pelo sistema de segurança, porém, a presença de produtos de fissão em seu núcleo faz com que o reator continue a gerar uma quantidade de calor da ordem de 2% da potência nominal do reator. Assim, estas válvulas permitem a entrada de água da piscina no *Plenum* do reator, refrigerando o núcleo e retornando para a piscina pela abertura no topo da chaminé. A circulação natural no reator pode ser observada na Figura 2.11.

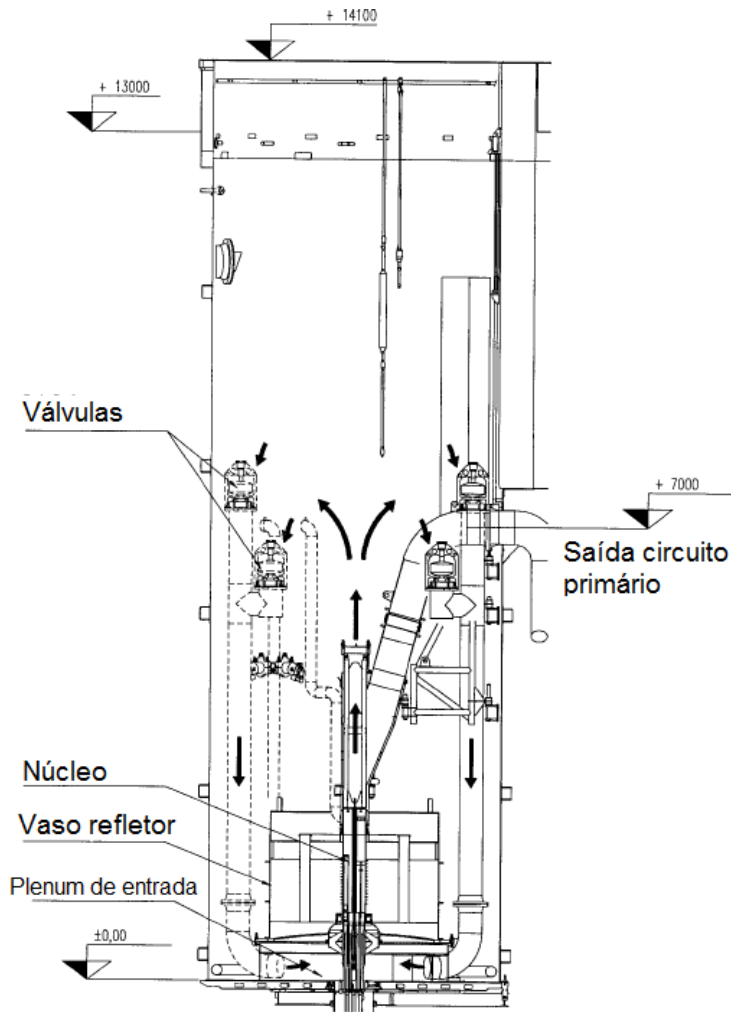


Figura 2.11: Circulação natural no reator (Fonte: PSAR, 2001).

Há um segundo circuito de refrigeração da piscina, denominado de refrigeração de longo prazo que atua quando o reator está em circulação natural, succionando água na chaminé acima do núcleo, reduzindo a vazão de água aquecida e contaminada do núcleo para a piscina do reator.

A água dos circuitos de refrigeração passa por um processo de purificação que envolve o processo de eliminação de elementos radioativos através dos tanques de decaimento. Estes tanques são blindados radiologicamente e permitem que os isótopos radioativos presentes na água, como o Nitrogênio-16, decaiam para um estado estável não radioativo. Ao sair do tanque de decaimento a água passa por filtros de resina, limitando a concentração de íons. JUN et al (2010) em seus estudos do trocador de íons do reator HANARO, verificou uma eficiência de remoção do  $\text{Na}^{24}$  e do  $\text{Mg}^{27}$  de 0,845 para a resina velha e entre 0,899 e 0,975

para a resina nova. Por se tratar de um gás nobre, o  $\text{Ar}^{41}$  não é eliminado da água pela resina do trocador de íons.

Após a purificação da água, os sistemas de refrigeração primário do núcleo, refrigeração da piscina e do tanque de água pesada trocam calor com um circuito de refrigeração secundário por meio de trocadores de calor tipo placa. Este circuito secundário, que também apresenta um sistema de purificação, é conectado a torres de resfriamento que eliminam o calor do sistema, há um circuito terciário entre as torres de resfriamento e o secundário. A Figura 2.12 apresenta um diagrama dos circuitos de refrigeração do reator.

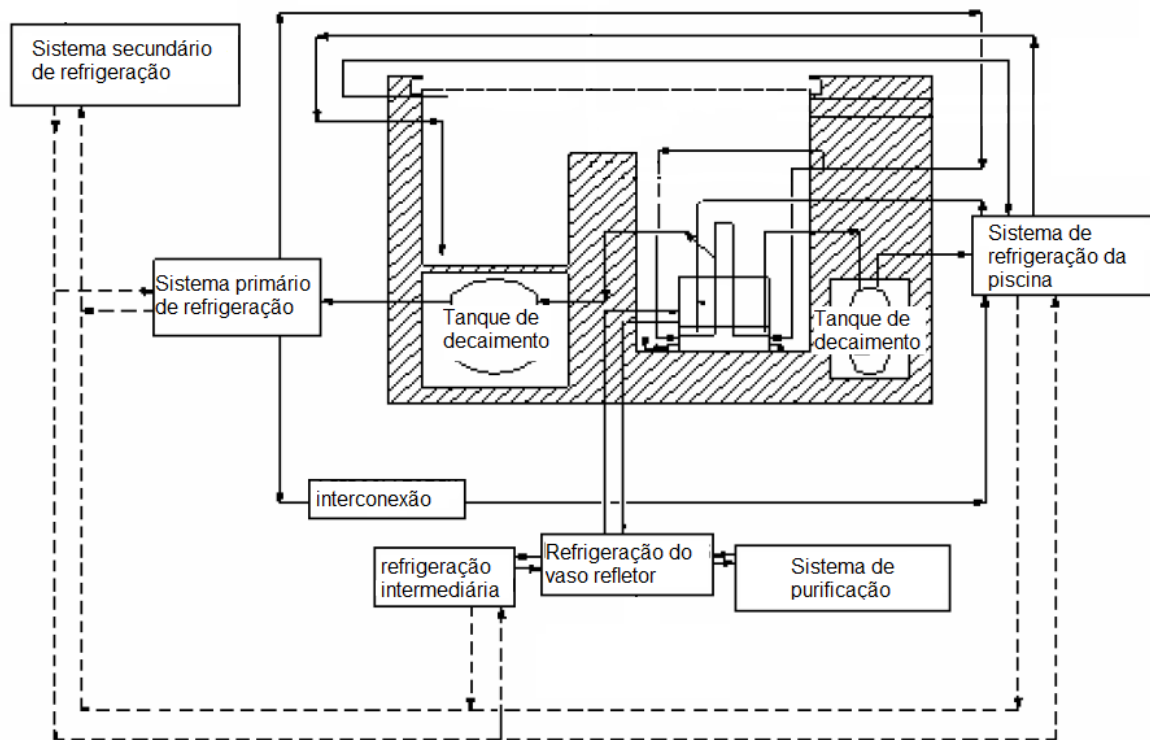


Figura 2.12: Diagrama dos circuitos de refrigeração do reator (Fonte: SAR, 2004).

### 2.3.2. Sistema de Camada de Água Quente

No topo da piscina, um circuito adicional de aquecimento e purificação injeta água, por meio de difusores, a uma temperatura mais elevada que o restante da piscina e succiona água a 1,5 metros abaixo do nível de injeção, criando uma camada de água quente estabilizada no topo da piscina do reator. Esta camada atua como uma barreira, impedindo que a água contaminada com partículas radioativas na piscina atinja a superfície por



movimento de convecção, o que elevaria a dose de radiação na sala do reator. Esta instalação é usual nos reatores de pesquisa de potências elevadas para auxiliar na proteção contra a radiação na superfície da piscina. Para este circuito é dado o nome de CAQ (Circuito de Água Quente).

Um reservatório auxiliar de água, ligado ao circuito da CAQ, pode ser usado para elevar o nível da piscina e promover o seu transbordo para a remoção de partículas suspensas, assim, realizando a limpeza da superfície de água da piscina mantendo a visibilidade do núcleo.

O sistema da camada de água quente é formado por um circuito com duas bombas que atuam em redundância, duas resistências elétricas de aquecimento que são acionadas em conjunto apenas para a formação inicial da camada e por um sistema de decaimento, filtragem por resina e coluna troca íons para a sua purificação. O diagrama da Figura 2.13 apresenta a instalação do circuito na piscina do reator.

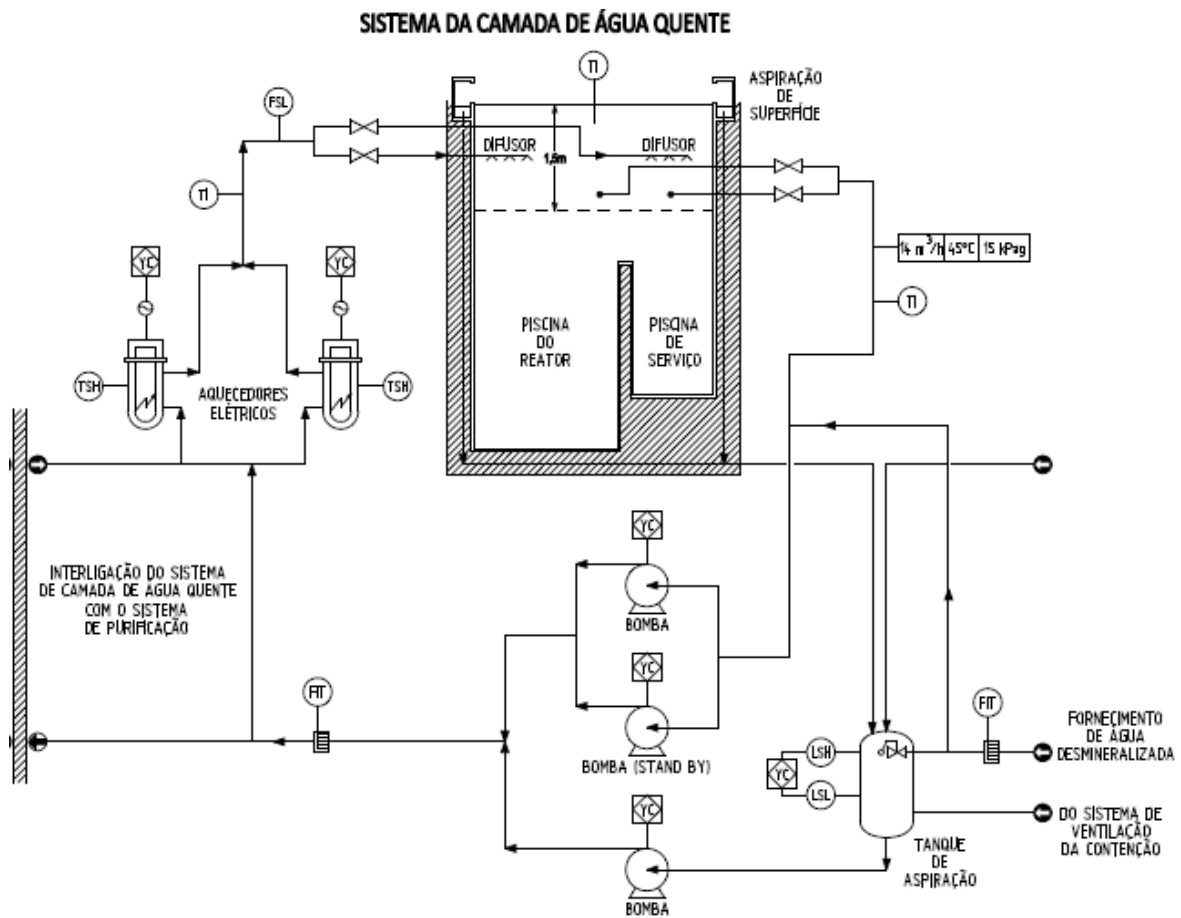


Figura 2.13: Diagrama do circuito da Camada de Água Quente (Fonte: NAVARRO, 2010).

Metcalf (2010) cita em seu trabalho sobre a otimização do controle da camada de água quente no reator *OPAL*, que estudos da *INVAP* indicam que uma diferença de temperatura de 5 °C entre a CAQ e o restante da piscina abaixo desta camada garante uma proteção radiológica eficaz do reator.

#### 2.4. Estudos da Camada de Água Quente em reatores de pesquisa

Shokr (2006) realizou uma análise da radiação no topo do reator ETRR-2, um reator de piscina aberta com potência de 22 MW que apresenta uma camada quente de 1,5 metros de espessura e diferença de 5 °C de temperatura para o restante da piscina. Foi demonstrada no estudo a eficácia da camada de água quente na redução da dose de radiação na superfície da piscina, observada no gráfico apresentado por ele na Figura 2.14 e a importância da purificação da água da CAQ, como apresentado na Figura 2.15.

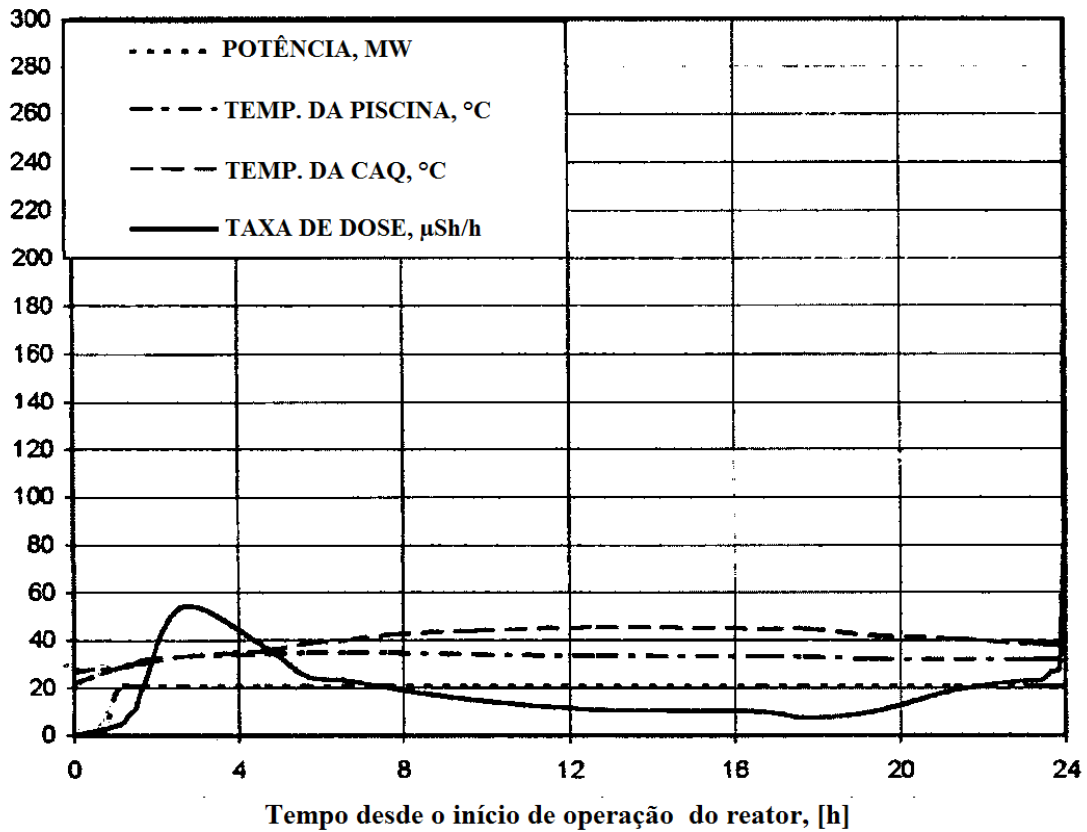


Figura 2.14: Gráfico da taxa de dose de radiação e temperatura da piscina do ETRR-2 (Fonte: SHOKR, 2006).

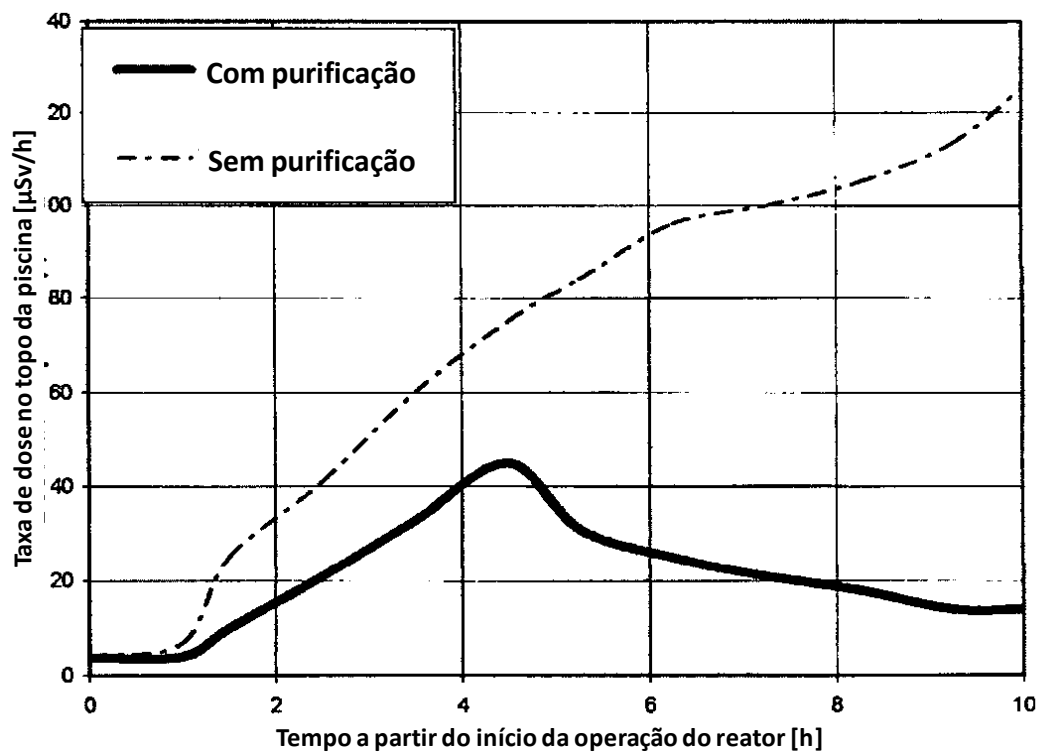


Figura 2.15: Gráfico da taxa de dose de radiação no ETRR-2 ao longo de sua operação (Fonte: SHOKR, 2006).

Na Figura 2.14 observa-se que no início de operação do reator a temperatura da água da piscina aumenta, promovendo a destruição da CAQ até aproximadas 6 horas de operação, quando a camada de água quente se restabelece. Neste intervalo a taxa de dose no topo da piscina atinge o seu valor máximo. Após 8 horas, a CAQ é estabilizada e a taxa de dose de radiação medida é inferior a 20  $\mu\text{Sv/h}$ , não apresentando risco ao operador. A dose de radiação anual máxima estipulada para um trabalhador de central nuclear é de 20.000  $\mu\text{Sv}$ . No experimento deste gráfico, após 18 horas o circuito da CAQ é desligado o que provoca um aumento da dose de radiação medida na superfície da piscina.

Na Figura 2.15, observa-se que, após o desligamento do sistema de purificação da CAQ, a taxa de dose no topo da piscina sobe de forma descontrolada até a décima hora, quando faz-se necessário o desligamento do reator.

Lee et. al. (1999) realizou um estudo da redução da radiação no topo da piscina do reator de pesquisa coreano HANARO de 30 MW. Neste reator, não estava previsto no projeto a instalação da camada de água quente em seu topo, porém, devido ao valor de radiação medida ser superior ao desejado, tornou-se necessário a utilização do sistema de proteção. No gráfico da Figura 2.16 é apresentada a distribuição da temperatura e a atividade de Na-24, que é uma medida do número de decaimentos que emitem radiação gama deste isótopo por unidade de volume dado por  $\text{Bq/cm}^3$ . Observa-se que com a aplicação da camada quente a atividade no topo da piscina atingiu o valor de 1/30 do valor encontrado no fundo da piscina.

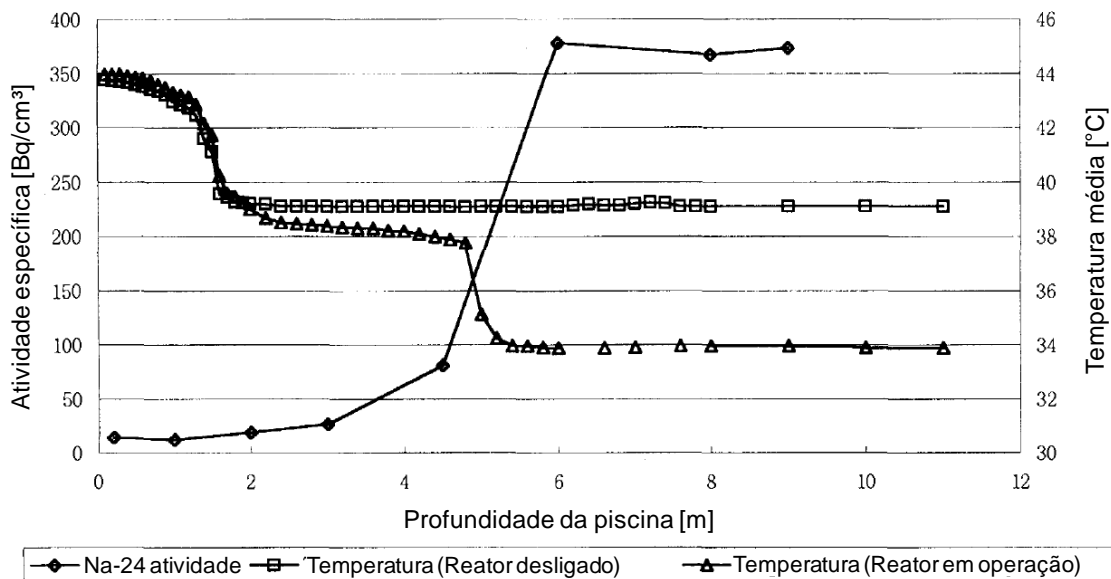


Figura 2.16: Gráfico da atividade e temperatura no HANARO (Fonte: LEE et al, 1999).

Em decorrência desta menor atividade, Lee et. al. (1999) verificaram uma radioatividade 10 vezes menor do que a observada antes da instalação da camada de água quente, como pode ser visto no gráfico da Figura 2.17.

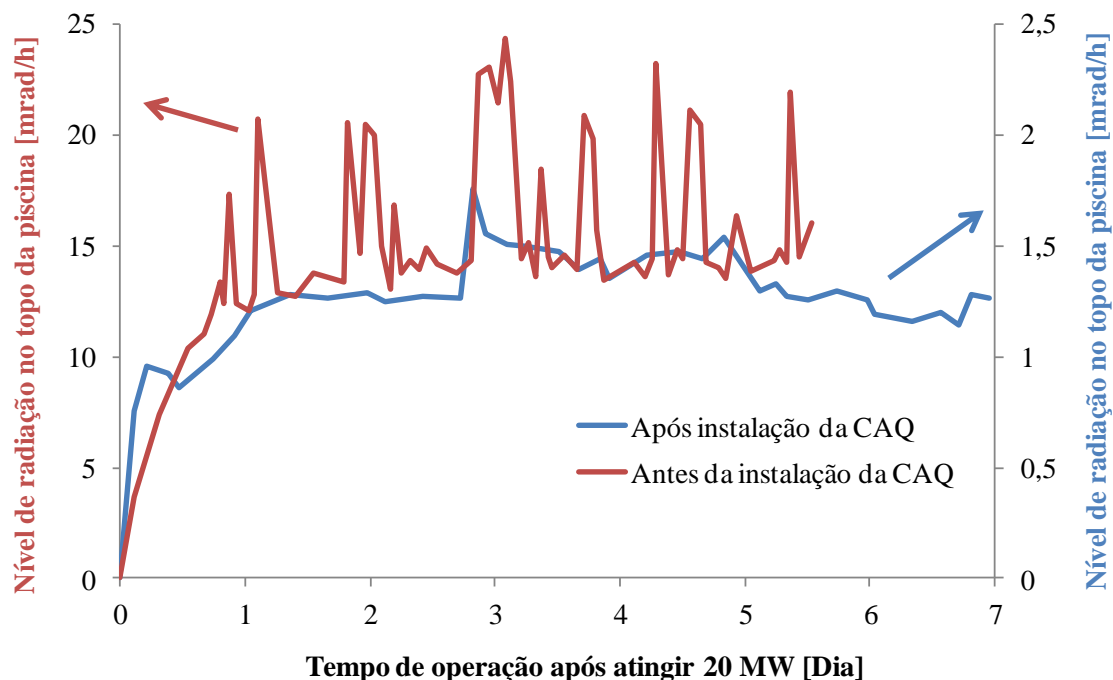


Figura 2.17: Gráfico da radiação no topo da piscina do HANARO (Fonte: LEE et al, 1999).

Kim et. al. (2006) efetuaram um estudo do comportamento da camada de água quente na piscina do reator HANARO utilizando *CFD* e verificaram que o principal fator de

destruição da camada se dá pela injeção de água do circuito de refrigeração da piscina a uma temperatura superior àquela da água da piscina, o que gera grande movimento convectivo e mistura em seu topo. Esta injeção de água aquecida é decorrente do sistema de interconexão do sistema de refrigeração primário com o da piscina e ocorre no início de operação do reator antes da piscina atingir seu equilíbrio térmico com a temperatura de injeção de seu sistema de refrigeração.

Ribeiro (1995) realizou um estudo teórico da CAQ de um protótipo de reator de pesquisa baseado no reator francês Siloé de 10 MW. Em seu estudo, foi realizada a simulação numérica deste protótipo utilizando um código de CFD próprio. Os resultados obtidos foram comparados com um experimento em escala reduzida 1/10 deste protótipo. No experimento, foram reproduzidos os sistemas de circulação de água que interagem com a piscina, sendo monitorada a temperatura em diferentes pontos da CAQ.

Por meio da análise dimensional e pela comparação dos resultados numéricos e experimentais, Ribeiro (1995) constatou que o número adimensional que melhor reproduziu o experimento em escala foi o Número de Froude, observando o mesmo comportamento da CAQ entre o experimento e simulação. Apesar do resultado obtido, o estudo de Ribeiro (1995) apresentou algumas limitações, citadas pelo próprio autor em sua conclusão, dentre elas cita-se:

-Tanto para a simulação quanto para o experimento foi considerada uma geometria bidimensional. No caso do experimento um tanque de acrílico com 100 mm de profundidade;

-O código de *CFD* utilizado é bem limitado, sendo a simulação numérica realizada em regime permanente e o escoamento unicamente laminar;

-As medições no experimento da CAQ foram feitas por um único termopar que necessitava ser deslocado para realizar o mapeamento de temperatura na região.

Desta forma, verificou-se que o estudo de Ribeiro (1995) não foi capaz de analisar transientes que ocorrem no início de operação do reator, que é o período de maior

perturbação na CAQ (SHOKR, 2006), por impossibilitar uma análise transiente pela limitação do código de *CFD* e pela necessidade de movimentação do termopar no experimento, o que impede o registro de temperatura, posição e tempo de forma independente, além do domínio bidimensional e a simulação não serem uma representação satisfatória da piscina do reator.

## 2.5. Mecânica dos Fluidos Computacional (*CFD – Computational Fluids Dynamics*)

A mecânica dos fluidos computacional ou simplesmente *CFD* é a análise de sistemas envolvendo escoamento de fluido, transferência de calor e fenômenos associados como reações químicas, combustão e mudança de fase, por meio de simulações baseadas em computador. O método trabalha resolvendo as equações termo e fluidodinâmicas através de um processo numérico. A Figura 2.18 exemplifica a tarefa do método numérico, que é transformar uma equação diferencial, definida no domínio de forma contínua, em um sistema de equações algébricas, discretizando o domínio em um número de subdomínios não coincidentes formando uma malha de pequenos elementos (ou volumes de controle) para os quais uma solução discreta pode ser obtida.

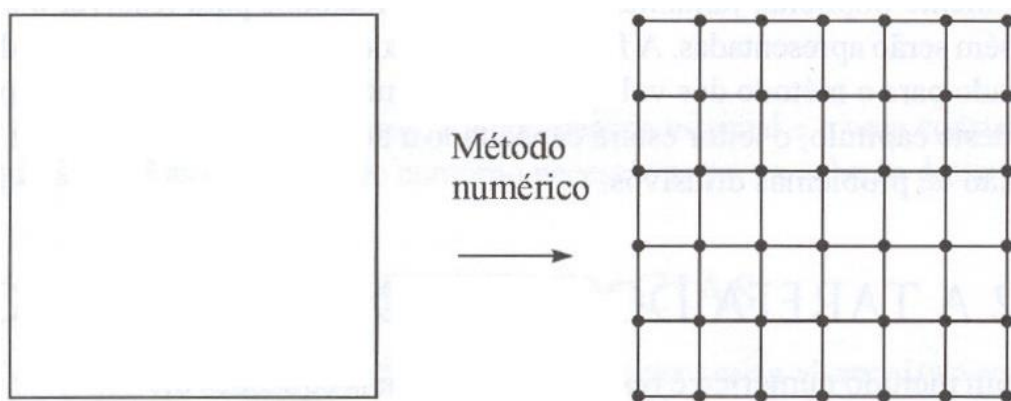


Figura 2.18: Domínio contínuo e discreto (Fonte: Maliska, 1998).

Os códigos e metodologias *CFD* são, de maneira geral, estruturados em quatro elementos principais:

- **Confecção da geometria e malha:** Consiste em definir a região de simulação, determinar possíveis simplificações a serem realizadas na geometria para a simulação,

como o uso de simetria, e discretizar o domínio em um conjunto de elementos ou volumes discretos formando uma malha.

- **Definição das condições de cálculo:** Nesta etapa são definidas as condições físicas do problema como a seleção dos fenômenos físicos e/ou químicos a ser modelada, definição das características do fluido, especificação das condições iniciais de escoamento, seleção das condições de contorno e definição dos parâmetros numéricos.

- **Solução do conjunto de equações discretizadas:** Consiste no uso de um método numérico para a discretização e solução das equações diferenciais na malha e condições definidas. Entre os métodos mais utilizados estão diferenças finitas, volumes finitos (MVF) e elementos finitos, sendo o MVF o mais aplicado em códigos comerciais de fluidodinâmica.

- **Análise dos resultados:** resultados qualitativos e quantitativos são extraídos da simulação, através de funções de visualização, de gráficos, tabelas de dados, relações matemáticas, etc.

### 2.5.1. Equações fundamentais

Em um cálculo *CFD* são solucionadas as equações fundamentais do transporte de massa (Equação 2.1), momentum (Navier-Stokes) (Equação 2.2) e energia (Equação 2.3) em um fluido contínuo, apresentadas a seguir na notação tensorial compacta.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_{M_i} \quad (2.2)$$



$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h_{tot}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ u_i \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_E \quad (2.3)$$

onde  $h_{tot} = h_{(T,p)} + 1/2(u_i^2)$  é a entalpia total,  $S_{M_i}$  e  $S_E$  representam os termos fontes das equações de momentum e energia respectivamente.

Estas equações podem ser apresentadas na forma genérica mostrada na Equação 2.4.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \Gamma_\phi \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \right\} + S_\phi \quad (2.4)$$

### 2.5.2. Modelo de turbulência

No sistema definido pelas equações de transporte e por uma equação de estado da forma  $\rho = \rho(h,p)$  que define o estado físico do fluido, a quantidade de incógnitas é igual a de equações, o que torna o sistema fechado. Apesar disto, a solução das equações não é uma tarefa simples. Até hoje não há uma solução analítica para as equações de Navier-Stokes e uma solução numérica direta (*DNS – Direct Numerical Simulation*) das equações não é possível para geometrias e escoamentos complexos devido à multiplicidade de escalas da turbulência e a interação não-linear entre elas.

Há diferentes métodos de simulação da turbulência, sendo apresentado apenas o método que será utilizado no presente trabalho, que representa o comportamento médio do escoamento ocultando a maioria das oscilações e instabilidades presentes devido à turbulência. As equações resultantes desta abordagem, obtidas através da mediação do sistema de equações no tempo, é conhecido como *RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes - equações de Navier-Stokes mediadas por Reynolds)* e *URANS (Unsteady RANS – RANS transiente)* quando são dedicadas a solução em regime transiente.

Para se obter as equações *RANS*, todas as variáveis do sistema de equações *CFD*, representadas aqui de forma genérica pelo símbolo  $\phi$ , podem ser decompostas em uma

componente média,  $\bar{\phi}$ , e uma componente flutuante,  $\phi'$ . Realizando uma mediação no tempo e aplicando a decomposição nas equações de transporte resulta na Equação 2.5.

$$\frac{\partial(\rho\bar{\phi})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\bar{u}_i\bar{\phi}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \Gamma_\phi \left( \frac{\partial\bar{\phi}}{\partial x_j} \right) - \rho\overline{u'_i\phi'} \right\} + S_\phi \quad (2.5)$$

Devido ao filtro temporal das equações de transporte, o efeito da turbulência fica isolado em apenas um termo de fluxos turbulentos,  $-\rho\overline{u'_i\phi'}$ , que representa um momento estatístico de segunda ordem (média de conjunto do produto de duas variáveis), chamado de tensor de Reynolds. Por ser um termo não linear de interações de flutuações de variáveis, este termo é de solução complexa.

Uma técnica de solução para as equações *RANS* é o uso da analogia da viscosidade turbulenta  $\mu_t$ , que propõe para o termo das equações de transporte de momentum que os fluxos turbulentos possam ser associados à taxa de deformação média de um elemento fluido supondo uma turbulência isotrópica, mostrado na Equação 2.6, e de forma análoga a difusividade turbulenta ( $\Gamma_t$ ), que propõe que os fluxos turbulentos de grandezas escalares sejam lineamente relacionados ao gradiente médio do escalar, mostrado na Equação 2.7.

$$-\rho\overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho\bar{k} \quad (2.6)$$

$$-\rho\overline{u'_i\phi'} = \Gamma_t \frac{\partial\bar{\phi}}{\partial x_i} \quad (2.7)$$

onde  $\delta_{ij}$  é conhecida como função delta de Kronecker, que para  $i = j$  é igual a um e para  $i \neq j$  é igual à zero, e  $\bar{k} = \overline{u'_i u'_i} / 2$  é a energia cinética turbulenta.

A difusividade turbulenta pode ser associada à viscosidade turbulenta através da relação:

$$\Gamma_t = \mu_t / \text{Pr}_t \quad (2.8)$$

Considerando que o número de Prandtl turbulento  $\text{Pr}_t$  é normalmente constante e igual a 0,9 (ANSYS, 2013), os fluxos turbulentos são reduzidos a uma variável, a viscosidade turbulenta, a qual deve ser modelada.

Vários modelos de turbulência para descrever a viscosidade turbulenta foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas. Em geral são usadas equações de transporte para descrever a energia e dissipação da turbulência, sendo estes modelos categorizados de acordo com o número de equações usadas. Assim, os modelos chamados de primeira ordem usam apenas uma equação de transporte, os de segunda ordem usam duas equações, e assim por diante. Os principais modelos de viscosidade turbulenta são de segunda ordem, por fornecerem uma boa relação entre custo computacional e qualidade. Dentre eles será adotado o Modelo  $k$ - $\varepsilon$ .

O Modelo  $k$ - $\varepsilon$  é o mais popular modelo de duas equações. Este modelo também é conhecido por  $k$ - $\varepsilon$  padrão, devido ao grande número de derivações do original. Neste modelo a viscosidade turbulenta é modelada por meio do cálculo da equação de transporte para a energia cinética turbulenta,  $\bar{k}$ , e da dissipação turbulenta,  $\varepsilon$ , usando a seguinte relação:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\bar{k}^2}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

$$\bar{k} = \overline{u'_i u'_i} / 2 \quad (2.10)$$

$$\varepsilon = C_d \frac{k^{3/2}}{l} \quad (2.11)$$

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos adotados para a definição e proposição de um experimento em escala reduzida para validação do projeto conceitual da CAQ do RMB. Para se definir um modelo em escala reduzida foi necessário primeiro estabelecer as características do protótipo do RMB que seriam usadas, pois se trata de um reator em projeto que apresenta muitas variáveis em aberto.

Definido o protótipo, foi realizada uma análise dimensional do escoamento presente na piscina do RMB, focando na região da CAQ, avaliando a relação de forças de empuxo e inerciais presentes e a capacidade de reprodução desta relação em função da redução de escala. Com base nesta análise foram definidas as condições de contorno do modelo experimental em escala reduzida.

Com a geometria e condições de contorno do modelo em escala definidas, foi gerado um modelo virtual e uma malha para a discretização espacial do modelo. Essa foi utilizada para simular o escoamento de água e transferência de calor nas piscinas de serviço e do reator do RMB. Para isso foi utilizado o código de CFD ANSYS CFX 14.0 (2013). O mesmo procedimento usado foi adotado para simular o protótipo em escala real. A comparação das simulações possibilitou avaliar a capacidade de reprodução dos fenômenos mais relevantes para o comportamento da CAQ no experimento.

Com base nos parâmetros obtidos do modelo reduzido, foi elaborado um projeto de uma bancada experimental capaz de reproduzir o escoamento na piscina do RMB. Nesta etapa foram determinados os equipamentos necessários ao experimento e testados os sensores necessários à monitoração dos fenômenos envolvidos.

Uma síntese da metodologia utilizada é apresentada de forma esquemática na Figura 3.1

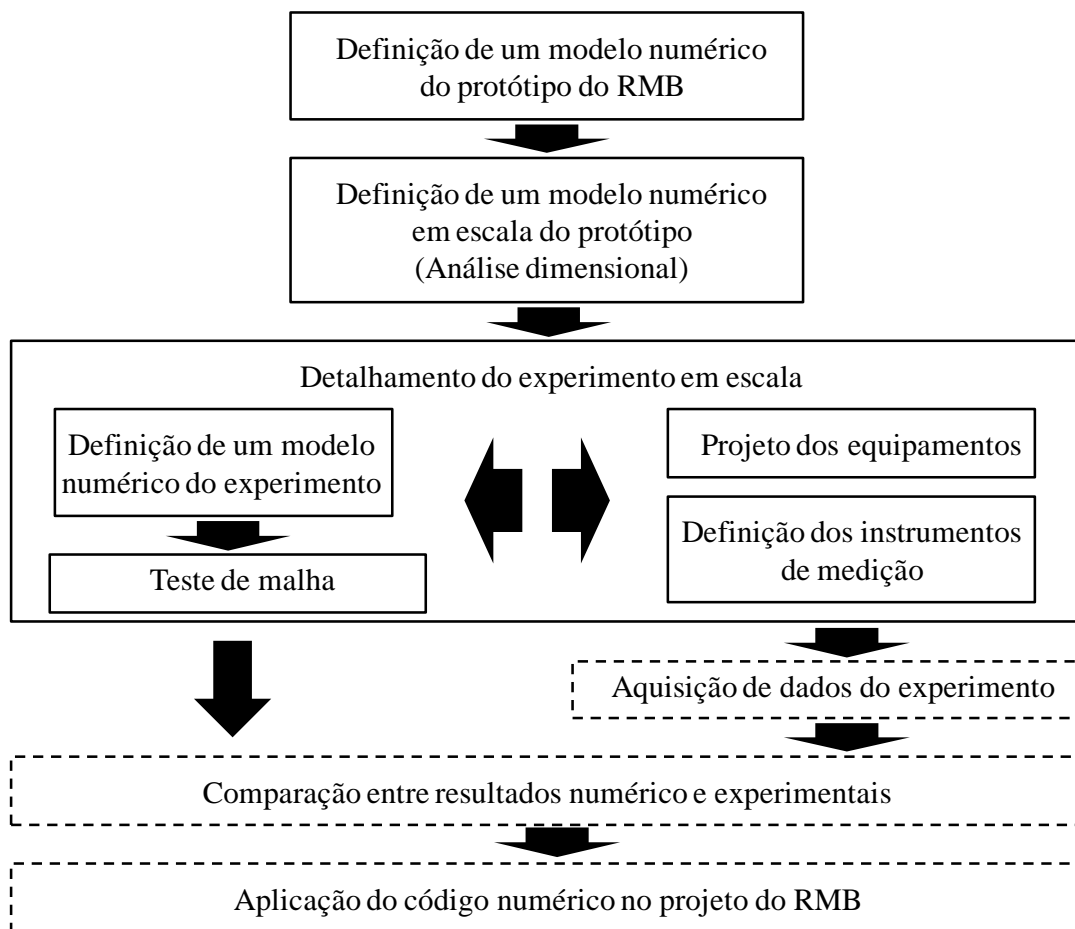


Figura 3.1: Procedimentos para a verificação e validação do Cálculo numérico.

Observa-se no esquema da Figura 3.1 que além da simulação em si da piscina do reator, os cálculos numéricos são aplicados na análise dimensional da piscina e interagem com os procedimentos de detalhamento de um experimento. Esta interação auxilia nas definições do projeto construtivo do experimento e da instrumentação de medição empregada.

Os procedimentos da Figura 3.1 apresentados em retângulos tracejados não fazem parte do escopo da dissertação. Estes são apresentados apenas para contextualizar o propósito geral que seria a validação do código, pela comparação dos resultados numéricos e experimentais, e a verificação, pela avaliação da incerteza de medição relativa aos parâmetros do código e testes dos modelos e malhas. A seguir são descritas as etapas empregadas nos procedimentos descritos no esquema da Figura 3.1.

### **3.1. DEFINIÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO DO PROTÓTIPO DO RMB.**

Como o projeto do RMB ainda está em execução, há muitas informações indefinidas ou indisponíveis em relação as características geométricas e termo-hidráulicas. Assim, tais características são inferidas por meio de dados coletados de reatores de pesquisa de concepções semelhantes ao RMB (*OPAL SAR 2004* e *PSAR 2001*). Desta forma, refere-se ao modelo numérico utilizado como protótipo, por não ser uma reprodução autêntica do RMB.

Este modelo numérico do protótipo corresponde ao utilizado por Schweizer (2012) em seu estudo preliminar da avaliação da potência dos aquecedores elétricos. Os mesmos parâmetros utilizados serão reproduzidos neste capítulo por se tratar de uma etapa de fundamental importância, que exemplifica a utilização do CFD e justifica a execução de um experimento e métodos para validação dos cálculos. Nas seções seguintes são descritos detalhes da geometria, malha, condições de contorno e as configurações realizadas.

#### **3.1.1. Geometria**

O modelo numérico do reator tem como foco o estudo de sua piscina. Neste modelo nenhum sistema que não faça parte da piscina foi simulado para a simplificação do cálculo. Assim, o circuito de refrigeração primário é representado apenas por uma saída de água na chaminé, que corresponde à sua interação com a piscina, onde não foi levada em conta a simulação de seu núcleo e nem a dinâmica de escoamento no interior da chaminé.

Para o estudo numérico do escoamento na Camada de Água Quente (CAQ) da piscina do RMB durante o início de operação do reator, foi utilizada a geometria mostrada na Figura 3.2. Esta geometria foi definida através de uma extrapolação dos dados presentes nos relatórios de segurança que descrevem o reator *OPAL, SAR (2004)* e *PSAR (2001)*, para as condições do projeto do RMB.

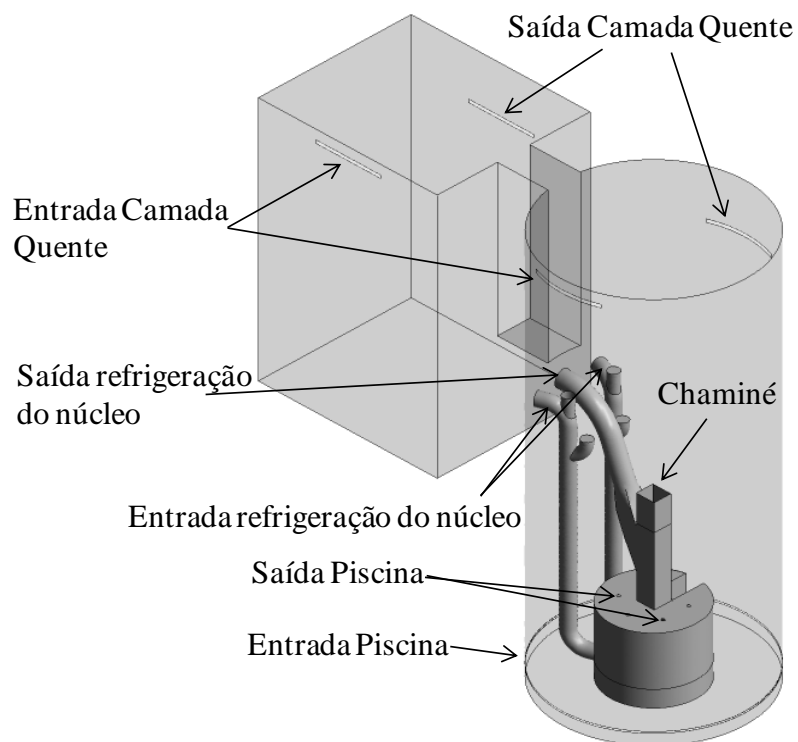


Figura 3.2: Geometria da piscina do protótipo do RMB.

Nesta geometria foram realizadas algumas simplificações: a saída do circuito da piscina, que passa pelos dispositivos de irradiação no tanque de água pesada, foi representada por 5 tubos de 100 mm de diâmetro; a injeção de água do circuito de refrigeração por um anel na base da piscina; e, as entradas e saídas do circuito da camada quente por janelas retangulares. Algumas das dimensões da geometria do protótipo do RMB são apresentadas na Figura 3.3.

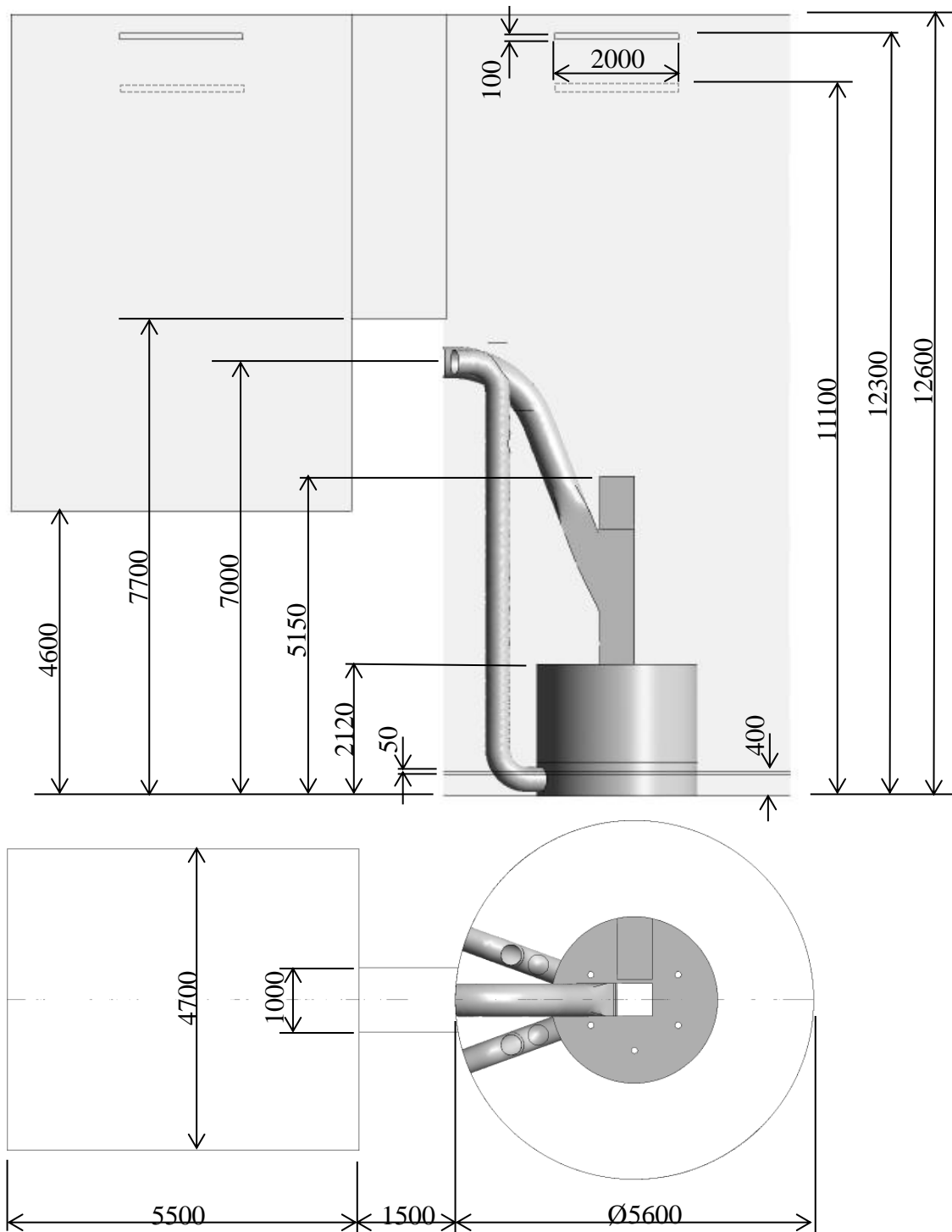


Figura 3.3: Detalhes da geometria do modelo.



### 3.1.2. Malha

A partir da geometria criada, foi gerada a malha do domínio fluido da piscina do protótipo do RMB. Esta malha representa a discretização do domínio que torna possível a execução do cálculo numérico. A Figura 3.4 apresenta a malha gerada.

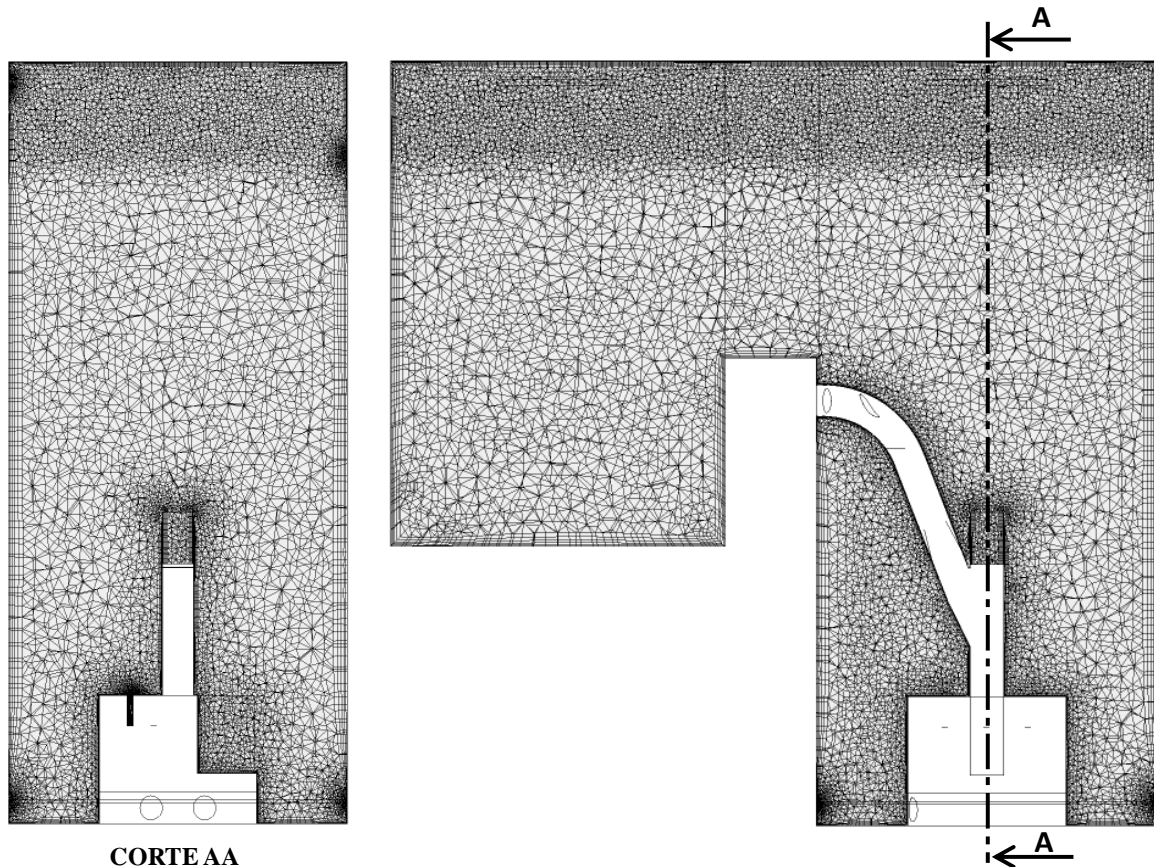


Figura 3.4: Plano longitudinal e corte da malha para simulação da operação do reator.

A malha gerada possui elementos tetraédricos e apresentou 693000 nós, o maior elemento com 250 milímetros, na parte inferior da piscina, e o menor com 0,50 milímetros, nas janelas do circuito da CAQ e na saída da piscina.

Nas paredes foi utilizado um recurso de refinamento de malha que cria camadas de elementos prismáticos paralelos para que a camada limite seja capturada adequadamente. Refinaram-se as faces correspondentes às entradas e saídas de água da piscina, na região próxima a entrada da chaminé e na região da CAQ, garantindo uma melhor reprodução do escoamento nestas regiões.

### 3.1.3. Condições de Contorno.

No domínio criado, foram simulados três circuitos que interagem com a piscina do reator: o circuito de refrigeração primário do núcleo que succiona água da piscina pela abertura da chaminé; o próprio circuito de refrigeração da piscina; e, o circuito do sistema de camada de água quente.

Como o reator RMB ainda está em fase inicial de projeto, os valores de vazão e temperatura foram extrapolados dos reatores de pesquisa *OPAL* de 20MW (SAR 2004 e PSAR 2001) e do reator Osíris de 70 MW (Commissariat a L'energie Atomique, 1970). A Tabela 3.1 apresenta os valores de vazão e temperatura utilizados nos circuitos que interagem com a piscina, no protótipo do RMB. Estas condições foram especificadas nas posições indicadas na Figura 3.2. Devido à ausência de dados, a turbulência em todas as entradas foi considerada de média intensidade, sendo configurada uma intensidade turbulenta de 5%.

Tabela 3.1: Condições de contorno aplicadas nos circuitos do RMB.

Contorno	Temperatura (°C)	Vazão(m <sup>3</sup> /h)
Entrada Piscina	33	540
Saída Piscina	Calculada	240
Saída Chaminé	Calculada	300
CAQ	45	14

Foi configurado um valor para a aceleração da gravidade de 9,81 m/s<sup>2</sup>. As propriedades da água foram consideradas constantes e para o cálculo do empuxo foi utilizada a aproximação de Boussinesq, em que se relacionam diretamente as forças resultantes da variação de massa específica à variação de temperatura. Todas as paredes do domínio foram consideradas lisas, exceto pelo topo da piscina que foi considerado sem atrito, a fim de representar melhor a interface com o ar.

Nas condições iniciais, a CAQ encontra-se formada a 45°C com uma profundidade de 1,5 metros. A temperatura do restante da piscina é definida na temperatura ambiente de 25°C. Nestas condições, são ligados os circuitos de refrigeração da piscina, o sistema da CAQ e a vazão induzida na chaminé pelo circuito primário de refrigeração do núcleo.

Observa-se que a temperatura de entrada do circuito de refrigeração da piscina apresenta um valor maior que a temperatura da piscina em seu instante inicial. Este aquecimento inicial se deve ao sistema de interconexão entre o circuito primário de refrigeração do núcleo e o circuito de refrigeração da piscina, onde mesmo com a água passando por trocadores de calor, esta chega à piscina a uma temperatura superior a do ambiente.

As trocas térmicas entre o corpo do reator e a piscina, das paredes da piscina para o exterior e do topo da piscina para a atmosfera foram desprezadas. Esta consideração se deve ao fato de o fluxo de calor por estas superfícies serem insignificantes perante a inserção e retirada de energia do volume de controle pelos circuitos de refrigeração durante o transiente inicial de partida do reator.

#### **3.1.4. Definições dos parâmetros numéricos de cálculo.**

A simulação do protótipo foi realizada em regime transiente e o tempo total de cálculo foi de 3 horas. O passo no tempo variou. Na primeira hora de simulação foi utilizado um passo no tempo variando entre 0,1 e 0,5 segundos. Após esta primeira hora, com o escoamento na piscina já estabilizado, o passo no tempo foi aumentado para 1,0 segundo.

Para convergência dos resultados de cada passo no tempo, foi considerado um erro residual RMS de  $5,0 \times 10^{-5}$  e, para cada passo no tempo, foi delimitados de 2 a 10 “*loops*” de cálculo para se atingir o erro residual.

O método de discretização dos termos advectivos das equações de transporte aplicadas ao volume de controle (“*Advection Scheme*”), foi configurado como alta resolução (“*High resolution*”), que é um método de discretização formalmente de segunda ordem, o que garante maior precisão no cálculo, tornando-o mais pesado que o método padrão de

diferenças a frente (*“Upwind”*), de primeira ordem. O termo transiente das equações foi discretizado com o método de Euler de segunda ordem (*“Second Order Backward Euler”*) (ANSYS CFX-14.0, 2013).

O modelo de turbulência adotado foi o padrão k- $\epsilon$ . Nesta dissertação, não foi avaliada sua influência no cálculo, pois esta etapa se dará em trabalhos posteriores, quando for possível comparar resultados numéricos e experimentais e, assim, definir um modelo que melhor reproduza o escoamento na piscina.

Uma configuração importante feita foi a inclusão do termo de produção e dissipação de turbulência devido ao empuxo no modelo de turbulência. Verificou-se que a ausência destas componentes na simulação resultou em uma mistura da CAQ na piscina do modelo, tornando a estratificação térmica muito fraca. Em escoamentos estratificados, a turbulência na interface é amortecida devido às forças de empuxo, reduzindo a difusão de calor entre elas. O modelo utilizado, por ser isotrópico, não consegue detectar este efeito, o que leva a uma difusão térmica excessiva. A inclusão dos termos de empuxo compensa este problema, refletindo melhor o comportamento físico presente.

Os cálculos foram realizados utilizando um conjunto de seis computadores com as seguintes características cada: dois processadores INTEL XEON 5520 de 2.2 GHz com quatro núcleos de processamento real cada; 24 GB de memória RAM; 1 TB de memória em disco rígido e rede de 1 Gbps.. Em cada computador foram utilizados 7 núcleos de processamento, resultando num total de 42 processadores usados por solução. O tempo de cálculo da operação do reator foi, em média, de 6 horas para simular 1 hora do modelo.

### **3.1.5. Métodos de Análise**

Uma aplicação da simulação numérica do protótipo do RMB foi avaliar o comportamento da CAQ para diferentes temperaturas de injeção, para determinação da potência do sistema de aquecimento. Foram estudados numericamente três níveis de elevação de temperatura de 5, 10 e 20 °C e assim, as respectivas potências nominais dos aquecedores. Os valores de potência obtidos podem ser observados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Potência de aquecimento.

Caso	$\Delta T$ [°C]	Potência [kW]
1	20	324
2	10	162
3	5	81

Nos casos 2 e 3 apresentados na Tabela 3.2 foi implementada uma função para reproduzir o aumento gradual de potência do reator de 0 a 30 MW em uma hora. Esta variação de potência foi aplicada ao modelo associando a potência do reator à temperatura de injeção no circuito da piscina. Esta associação se deve ao sistema de interconexão que mistura 10% da água do circuito primário, que passa pelo núcleo ao circuito de refrigeração da piscina. Desta forma, ao invés de a temperatura de injeção de água na piscina ser constante em 33 °C, ela varia de 25°C a 33 °C, desde o instante inicial até após uma hora de simulação, quando atinge o regime permanente.

Outra análise foi o teste de diferentes temperaturas de formação da CAQ para um mesmo valor de potência de aquecimento, de modo a verificar a influência da temperatura inicial no comportamento da CAQ quando iniciada a operação. Os valores de temperatura da CAQ são expostos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Temperatura de formação da CAQ.

Potência [kW]	Temperatura de formação CAQ [°C]
	35
162	38
	45

Em todos os casos a temperatura máxima da CAQ foi configurada como 45°C. Assim, após a saída da CAQ atingir esta temperatura, os aquecedores são desligados (METCALF, 2010).

Nestas simulações analisou-se a altura média da camada de água quente no decorrer da operação do reator. Para determinar a altura da CAQ foi implementada uma função no pós processador do CFX, que permitisse a localização da região da CAQ onde a diferença de temperatura entre os nós da malha e a temperatura média da piscina fosse igual a 5°C, caracterizando a região de estratificação. Para cada nó que satisfizesse tal condição, era retornado o valor de sua altura em relação ao fundo da piscina. Desta forma, a altura da CAQ foi determinada pela média das alturas ponderadas nos volumes dos respectivos nós. Esta função é mostrada na Equação 3.1. Os volumes 1 e 2 são mostrados na Figura 3.5.

$$\text{Altura}_{\text{CAQ}} = \frac{\sum Z_n(T) \cdot \text{Vol}_n(T)}{\sum \text{Vol}_n(T)} \quad (3.1)$$

Para:

$$4^\circ\text{C} \leq (T - T_{\text{REF}}) \leq 6^\circ\text{C}, Z_n(T) = Z_n, \text{Vol}_n(T) = \text{Vol}_n$$

$$(T - T_{\text{VOL\_ref}}) < 4^\circ\text{C} \text{ ou } (T - T_{\text{REF}}) > 6^\circ\text{C}, Z_n(T) = 0^\circ\text{C}, \text{Vol}_n(T) = 0 \text{ m}^3$$

Onde  $Z_n$  é a altura de cada nó da malha pertencente ao Volume 1,  $\text{Vol}_n$  é o volume de cada nó da malha pertencente ao Volume 1 e  $T_{\text{REF}}$  é a temperatura média no Volume 2.

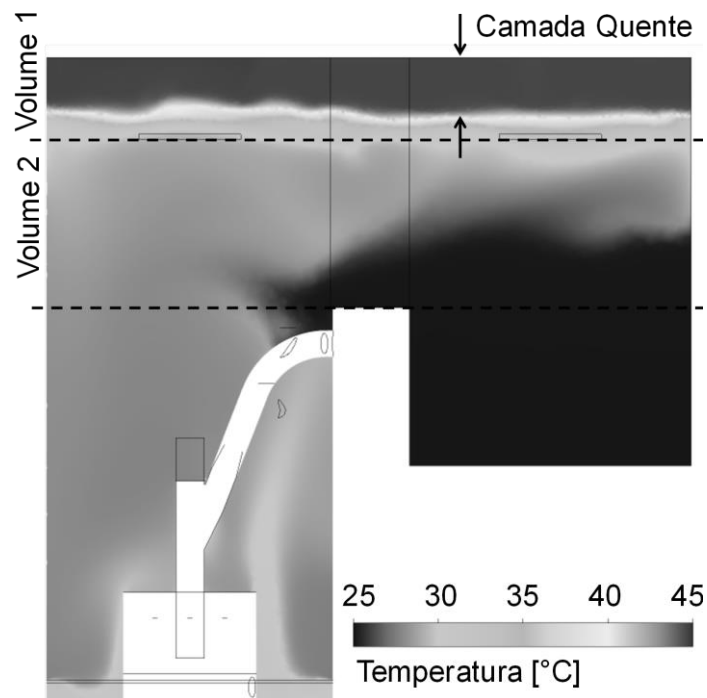


Figura 3.5: Localização dos Volumes 1 e 2 no protótipo do RMB.

De forma geral, a Equação 3.1 representa a fronteira da estratificação térmica, utilizando o critério de que a CAQ deve estar a uma temperatura de 5°C superior à piscina (METCALF, 2010).

Obtendo um valor de espessura média da CAQ ao longo da operação do reator, determinada pela subtração da altura total da piscina pela altura média da CAQ, foi possível realizar o cálculo da taxa de radiação no topo da piscina utilizando a norma que fornece um valor para a blindagem radiológica promovida pela piscina (British Standard 4094, 1966).

No estudo da piscina do RMB, foi considerado apenas o  $\text{Na}^{24}$ , por ser o principal radioisótopo emissor de radiação presente na piscina (JUN, 2010), sendo o material da blindagem a água com espessura correspondente àquela da CAQ. A utilização desta norma é uma simplificação por considerar toda emissão da piscina como uma fonte pontual de radiação gama. A Figura 3.6 apresenta a curva de transmissividade da radiação gama do  $\text{Na}^{24}$  em função da espessura da blindagem de água.

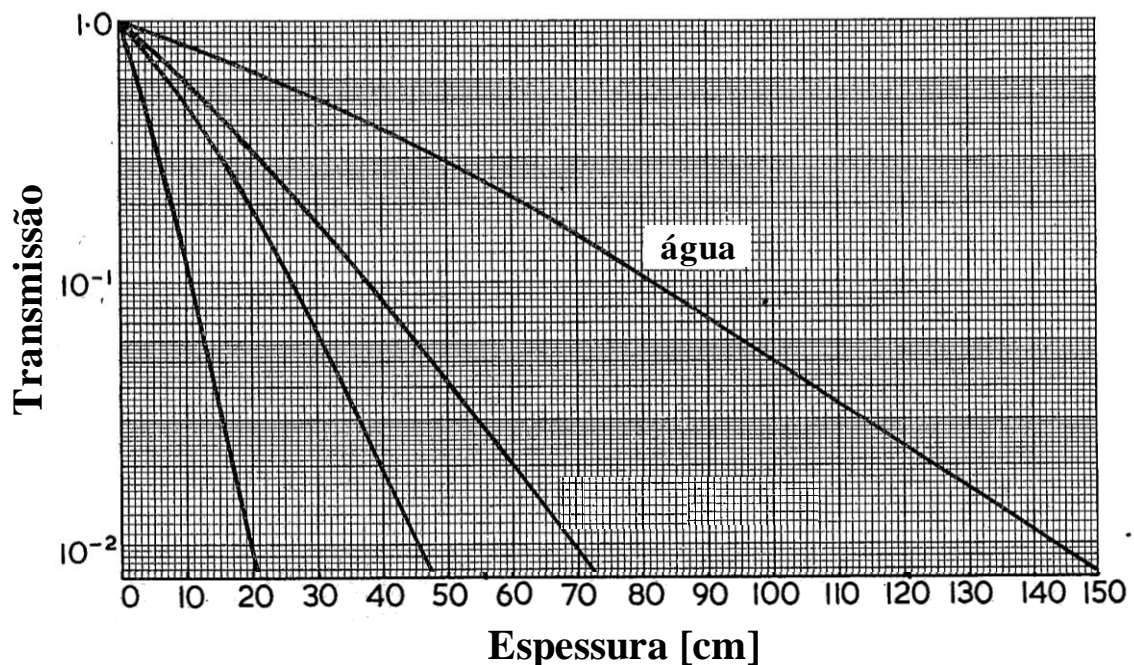


Figura 3.6: Gráfico da transmissão de radiação do  $\text{Na}^{24}$  pela blindagem de água

(Fonte: BRITISH STANDARD 4094, 1966).

Uma taxa de dose de 25 mSv/h foi obtida de estudos na piscina do reator de pesquisa HANARO de 30MW, operando a 20MW (LEE et al, 1999). Este valor foi registrado como pico da taxa de dose na superfície da piscina quando este entrou em operação sem a CAQ. Este valor foi adotado como valor de referência para a taxa de radiação emitida pela piscina do RMB.

Uma regressão do fator de transmissão em relação à espessura de água foi obtida do gráfico da Figura 3.6. A regressão com melhor ajuste para o dado intervalo foi a polinomial de 3º grau representada pela Equação 3.2, que apresentou  $R^2= 0,98$ . Multiplicando este fator pela taxa de dose inicial preestabelecida, obtém-se a taxa de dose de radiação após a blindagem do meio utilizando a Equação 3.3.

$$T(d) = -3,6177 \times 10^{-7} d^3 + 1,48093 \times 10^{-4} d^2 - 2,07067 \times 10^{-2} d + 1,00151 \quad (3.2)$$

onde:

T = fator de transmissão

d = espessura da camada de água em centímetros.

$$\text{Taxa de dose na superfície da piscina} = (\text{Taxa de dose inicial}) \times T(d) \quad (3.3)$$

Para a proteção radiológica na operação de reatores de pesquisa, é normatizado que a dose máxima a que os operadores do reator podem ser expor é de 20 mSv/ano.

## **3.2. DEFINIÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO EM ESCALA DO PROTÓTIPO DO RMB.**

### **3.2.1. Geometria**

O modelo em escala proposto consiste na redução do protótipo em uma razão de 1/10. Esta redução permite a construção em laboratório de um experimento com dimensões viáveis.



### 3.2.2. Malha

As malhas utilizadas no modelo numérico em escala são as mesmas do protótipo, porém, todas as medidas foram reduzidas em 10 vezes. O número de elementos e aspecto da malha permaneceram os mesmos para o protótipo e modelo reduzido.

### 3.2.3. Análise dimensional

Torna-se necessário a análise dimensional para se determinar as condições de contorno aplicáveis ao modelo que reproduza os mesmos fenômenos do protótipo.

Os principais fenômenos que ocorrem na CAQ são a estratificação térmica, causada pelo empuxo devido à diferença de temperatura entre as camadas de água, e as forças inerciais, causadas pelo escoamento da água na piscina. As razões entre estas duas forças devem ser iguais para que haja similaridade entre o protótipo e o modelo em escala (Ribeiro, 1995). Um número adimensional que representa esta relação de forças é o Número de Froude (Fr). A Equação 3.4 apresenta este número.

$$Fr_d = \frac{v^2}{g.l. \frac{\Delta\rho}{\rho}} \quad (3.4)$$

onde ( $v$ ) é a velocidade na região de estratificação térmica,  $g$  é a aceleração da gravidade, ( $l$ ) é o comprimento característico e  $(\Delta\rho/\rho)$  é a variação da massa específica na região de estratificação térmica.

As temperaturas de fluido aplicáveis no modelo reduzido foram as mesmas aplicadas no protótipo, como é apresentado na Equação 3.5:

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\text{modelo reduzido}} = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\text{prototipo}} \quad (3.5)$$

Devido à escala de 1/10 no modelo, a razão do comprimento característico é aquela apresentada na Equação 3.6:

$$l_{\text{modelo reduzido}} = \frac{1}{10} \cdot l_{\text{prototipo}} \quad (3.6)$$

Então, para manter a similaridade do número de Froude ( $Fr_{\text{modeloreduzido}} = Fr_{\text{protótipo}}$ ), a relação entre velocidades é apresentada na Equação 3.7:

$$v_{\text{modeloreduzido}} = \frac{v_{\text{prototipo}}}{\sqrt{10}} \quad (3.7)$$

Assim, a vazão mássica no modelo reduzido é apresentada na Equação 3.8:

$$\dot{m}_{\text{modeloreduzido}} = \frac{\dot{m}_{\text{prototipo}}}{100 \cdot \sqrt{10}} \quad (3.8)$$

Dividindo-se  $l_{\text{modelo reduzido}}$  por  $v_{\text{modeloreduzido}}$ , obtém-se a correspondência de tempo entre o modelo reduzido e o protótipo como apresentado na Equação 3.9:

$$t_{\text{modeloreduzido}} = \frac{\sqrt{10} \cdot t_{\text{prototipo}}}{10} \quad (3.9)$$

A partir da Equação 3.8, aplicando-se os dados de vazão do protótipo da Tabela 3.1, obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Valores de Vazão mássica aplicadas no modelo reduzido.

Contorno	Vazão Mássica (kg/s)	
	Protótipo	Modelo reduzido
Entrada piscina	149.55	0.473
Saída piscina	66.47	0.210
Saída chaminé	83.08	0.263
Entrada CAQ	3.88	0.012
Saída CAQ	3.88	0.012

#### 3.2.4. Definições dos parâmetros numéricos de cálculo.

Os parâmetros numéricos de cálculo foram os mesmos aplicados no protótipo, apresentados na seção 3.1.4. Para se manter a similaridade, o passo no tempo foi modificado pelo fator expresso na Equação 3.9.

#### 3.2.5. Método de Análise

A análise da CAQ foi feita pela comparação de valores de temperatura entre o protótipo e o modelo reduzido. A metodologia para extração de resultados foi a aplicação de dez linhas paralelas ao eixo Z, compreendidas entre o nível 10 m a 12,6 m no protótipo e de 1,0 m a 1,26 m no modelo reduzido. A disposição das linhas é apresentada na Figura 3.7.

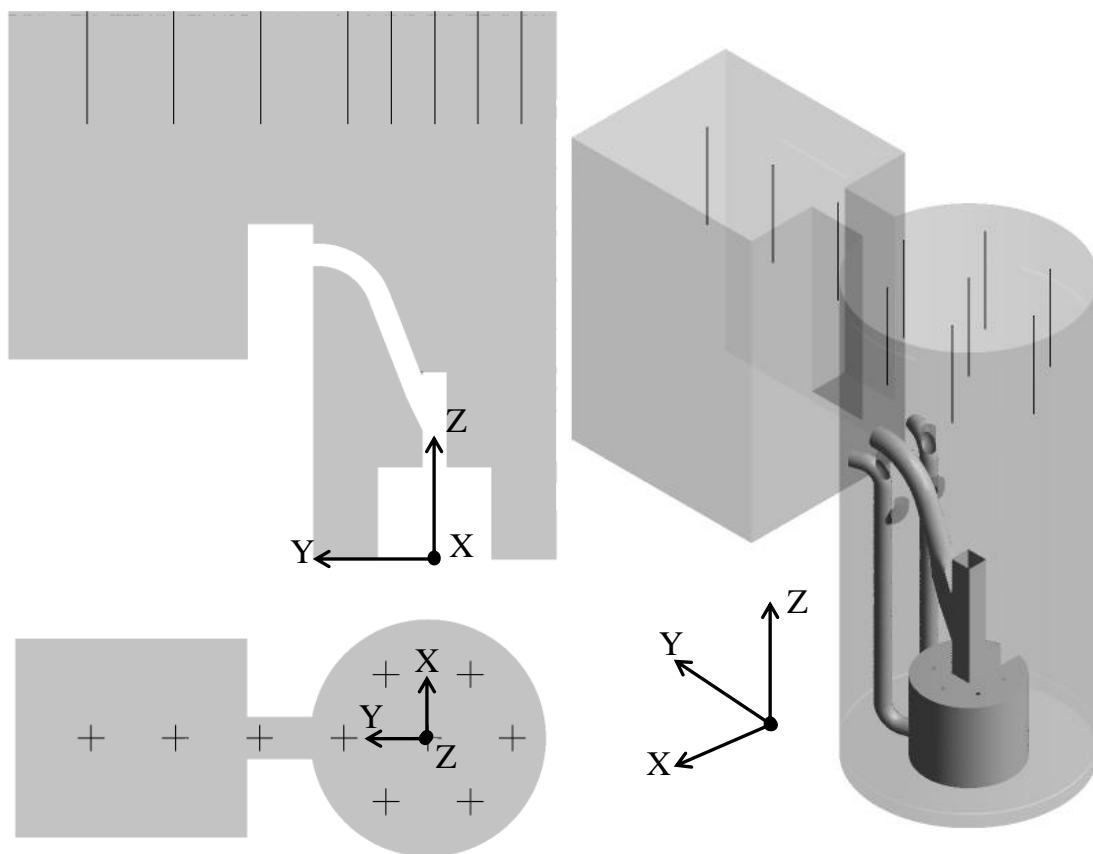


Figura 3.7: Disposição das linhas para análise de resultados no protótipo e no modelo reduzido.

Cada uma das linhas citadas corresponde a uma sonda na simulação numérica, apresentando 100 pontos onde é registrado o valor de temperatura e a posição em relação ao eixo Z, permitindo observar o perfil de temperatura ao longo de seu comprimento. Define-se a altura da CAQ como a região de gradiente de temperatura máxima na piscina, que corresponde justamente ao encontro da água fria da piscina com a CAQ. O valor aplicado na análise do modelo consiste na média de valores entre as 10 linhas.

### 3.3. DETALHAMENTO DO EXPERIMENTO EM ESCALA

Tomando como referência o modelo numérico reduzido, procurou-se seguir sua geometria e condições de contorno para o projeto de construção de um experimento em escala do RMB.

#### 3.3.1. Projeto da bancada experimental.

Para reproduzir a piscina do RMB, foi projetado um tanque seguindo as medidas utilizadas no modelo numérico em escala reduzida. Porém, tornaram-se necessárias algumas modificações para facilitar a construção do tanque e acesso visual a seu interior. Assim, a piscina do reator antes cilíndrica, foi confeccionada com paredes retas e quinas arredondadas como apresentado na Figura 3.8.

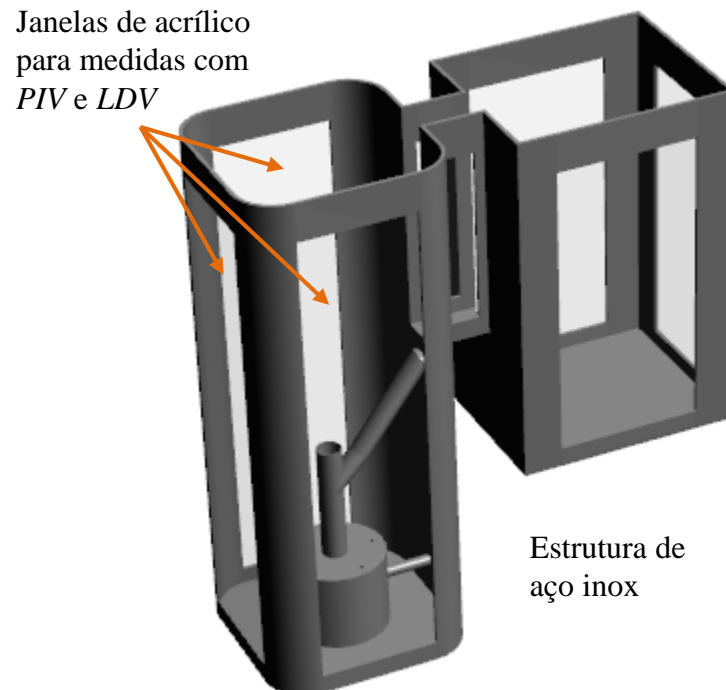


Figura 3.8: Desenho conceitual do tanque do experimento.

Como pode se observar na Figura 3.8, as paredes retas permitem a colocação de placas de acrílico transparente. Este acesso visual é útil, pois dará a possibilidade da medição de

velocidade por meio de equipamentos como o Velocímetro a Laser por efeito Doppler *LDV* (“*Laser Doppler Velocimetry*”) e um Velocímetro por Imagem de Partículas - *PIV* (“*Particle Image Velocimetry*”)

O material adotado no projeto de construção do tanque foi o aço inoxidável 304, devido à resistência mecânica obtida e por não gerar resíduos de corrosão na água, e as janelas são de acrílico transparente. O corpo do reator foi representado de forma simplificada por um cilindro de PVC no qual a chaminé consiste em um tubo de 2”. A Figura 3.9 apresenta maiores detalhes das dimensões do projeto do tanque e do corpo do reator.

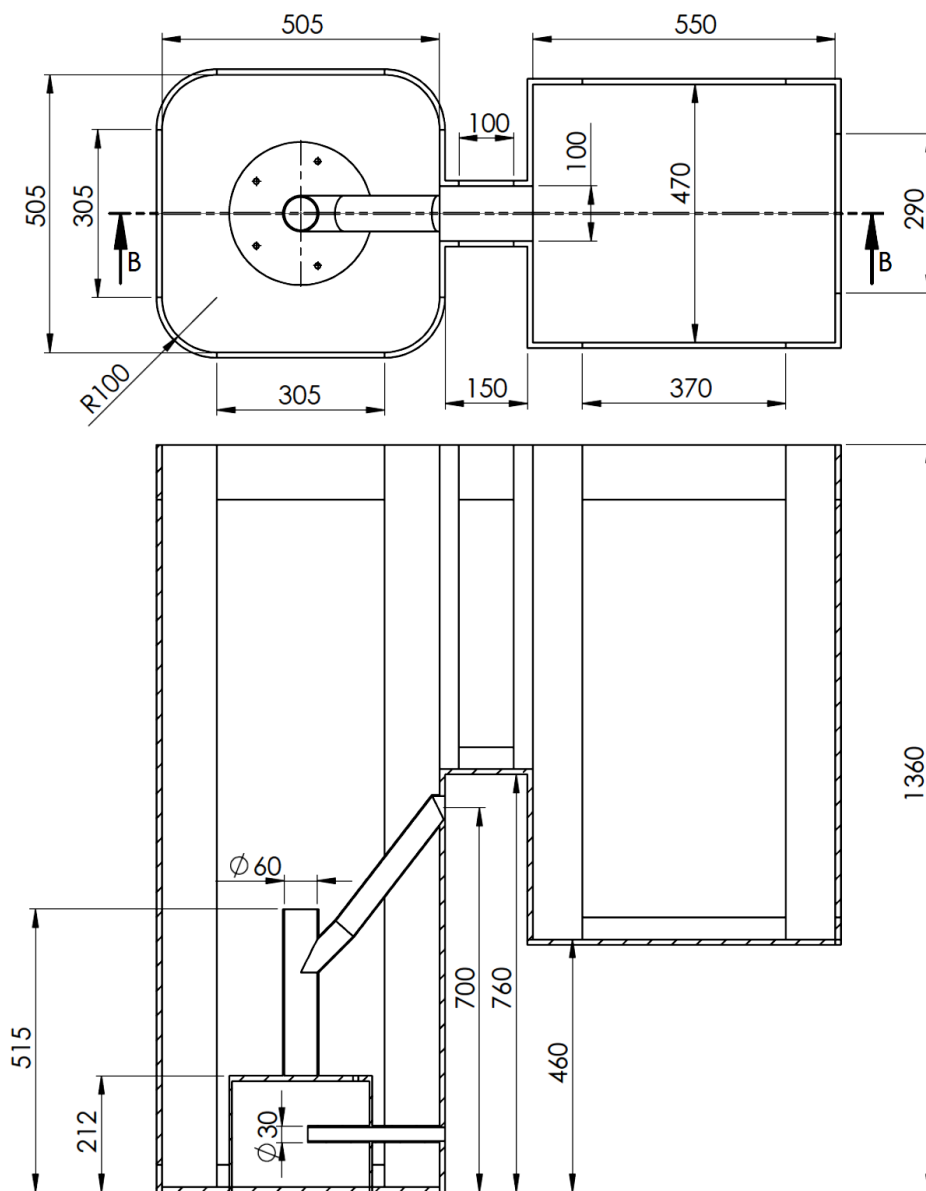


Figura 3.9: Principais dimensões do tanque do experimento.

Para se obter as condições de contorno necessárias para a reprodução dos fenômenos na piscina do reator, foi necessário o desenvolvimento de dois sistemas de circulação e aquecimento de água. Estes circuitos podem ser observados na Figura 3.10.

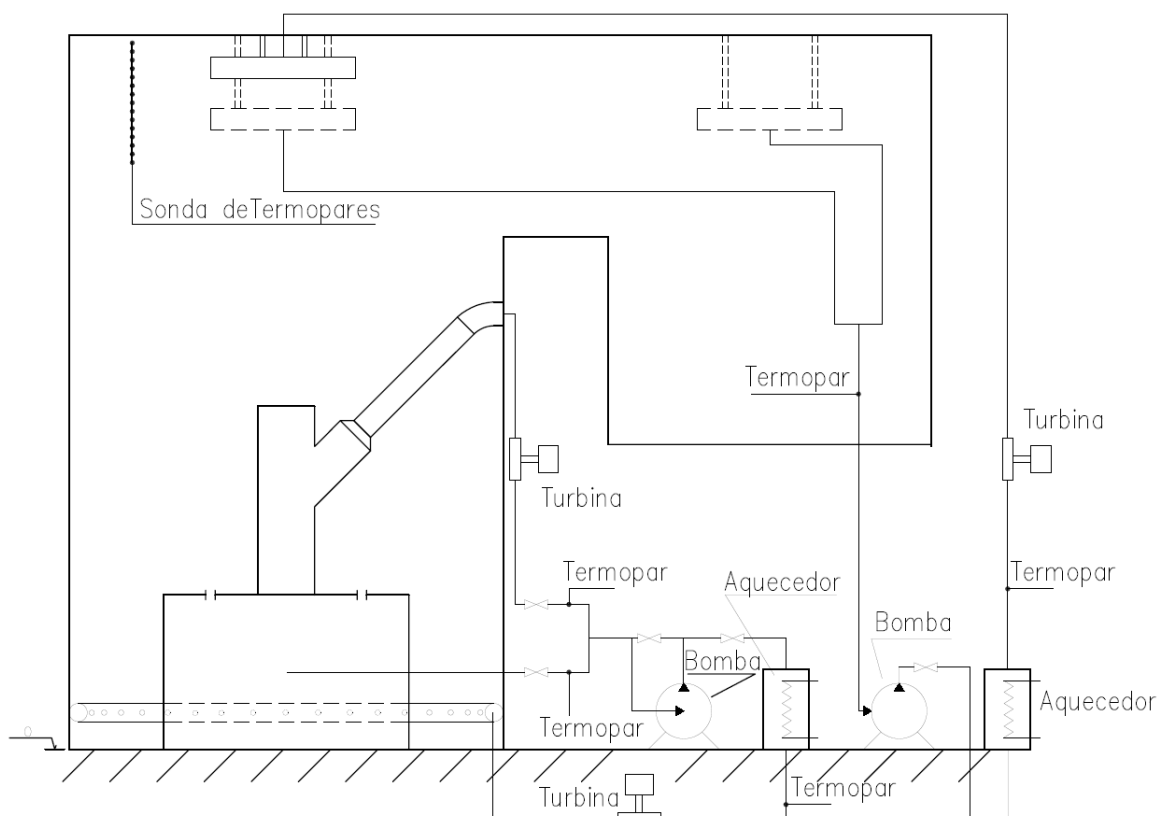


Figura 3.10: Fluxograma do experimento da CAQ.

Na Figura 3.10 observam-se dois circuitos, o da piscina e o da CAQ. O circuito da piscina, que tem por finalidade reproduzir o escoamento pela chaminé é o circuito de refrigeração da piscina no tanque do experimento. O circuito da CAQ tem por finalidade a formação de uma CAQ no tanque. Ambos os circuitos são compostos por uma bomba, um aquecedor elétrico de passagem e um conjunto de válvulas para controle do escoamento. A Tabela 3.5 apresenta as características dos equipamentos.

Tabela 3.5: Características dos equipamentos empregados no experimento

Equipamento	Quantidade	Circuito	Características
Bomba	1	Piscina	3 $\phi$ 220V, 1 cv
Aquecedores	2		3 $\phi$ 220V, 10 kW
Bomba	1	CAQ	12 V cc, 48 W
Aquecedor	1		220 V, 2 kW

Os aquecedores apresentados na Tabela 3.5 foram dimensionados de forma a garantir que, nas vazões apresentadas na Tabela 3.4 para experimento, haja um aumento de temperatura de 8 °C na temperatura de injeção da piscina e um aumento de 20 °C na injeção de água da CAQ.

O anel de injeção de água da piscina do modelo numérico em escala, foi reproduzido no experimento por um tubo de 25 mm que contorna o perímetro interno do tanque, com uma furação periódica em sua lateral, de modo a garantir uma vazão o mais uniforme possível no tanque, com uma velocidade próxima a 1 m/s.

As janelas de injeção e retirada de água da CAQ no modelo numérico em escala, no experimento, foram reproduzidas igualmente por uma tubulação perfurada, de modo a distribuir a vazão no tanque com uma velocidade inferior a 0,3 m/s.

### 3.3.2. Instrumentos de Medição.

No fluxograma da Figura 3.10, também são apresentados os instrumentos aplicados ao experimento. Estes são necessários para controle das condições de contorno, monitoração e aquisição dos dados experimentais propriamente ditos.

Para medição das vazões nos circuitos do experimento foram empregados medidores do tipo turbina por estes garantirem incerteza de medição da ordem de 1% do valor medido e atender uma faixa de medição maior que os demais tipos de medidores. No circuito da piscina, pretende-se monitorar as vazões da chaminé e de injeção no tanque, sendo o



controle da vazão da saída de água pelo corpo do reator igual à diferença das duas vazões monitoradas.

No circuito da CAQ, apenas uma turbina foi utilizada para monitorar a vazão de injeção. Mesmo este circuito apresentando duas saídas de água do tanque, desconsiderou-se a necessidade de monitorar uma possível diferença de vazão entre elas. As características fornecidas pelo fabricante das turbinas são apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Características dos medidores tipo turbina.

Equipamento	Circuito	Faixa de medição [l/min]	Incerteza do fabricante
Contech SLVT Ø1”tipo axial	Piscina	0 – 100	1,0 %
TecnoFluid TVTP Ø ½” tipo Pelton	CAQ	0,37 – 0,95	1,0%

A medição das temperaturas de injeção e retirada de água do tanque serão feitas pela inserção de termopares nas respectivas tubulações. Os termopares aplicados a esta função foram os do tipo “K”, com 1 mm de espessura, apresentando como característica de fábrica uma incerteza de  $\pm 2,2$  °C, porém com um processo de calibração bem efetuado é possível reduzir este valor a uma incerteza de  $\pm 1,0$  °C.

Já a estratificação térmica na CAQ é medida por uma sonda composta por 15 termopares, dispostos conforme Figura 3.11. Esta sonda é formada por 15 termopares do tipo “T” com 1,5 mm de espessura. Este tipo de termopar tem garantido pelo fabricante uma incerteza de medição de  $\pm 1,0$  °C, porém com uma calibração bem efetuada da sonda é possível reduzir esta incerteza para  $\pm 0,5$  °C.

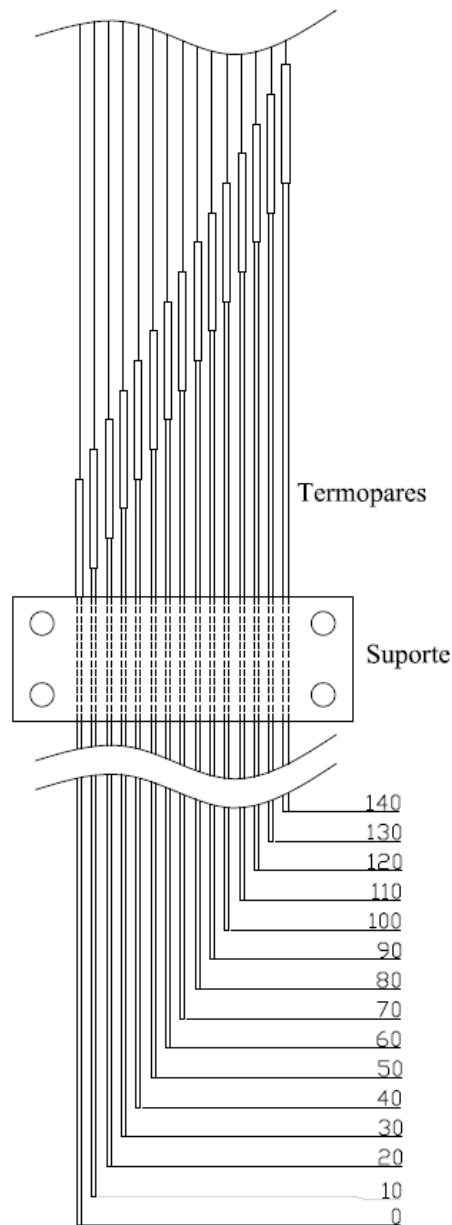


Figura 3.11: Projeto da sonda de termopares (medidas em mm).

### 3.3.3.1. Teste da turbina.

Para verificar a eficiência das turbinas, foram montados circuitos em que estas eram instaladas em conjunto com outro dispositivo de medida de vazão. Esta montagem possibilitou a verificação de funcionamento do equipamento e a sua calibração. A calibração das turbinas se dá pela obtenção da relação entre a vazão medida no sistema e o valor de corrente elétrica lida pelo computador em que é feita a aquisição dos dados.

A Figura 3.12 apresenta o esquema de montagem para teste e calibração da turbina aplicada na medição de vazão do circuito da CAQ.

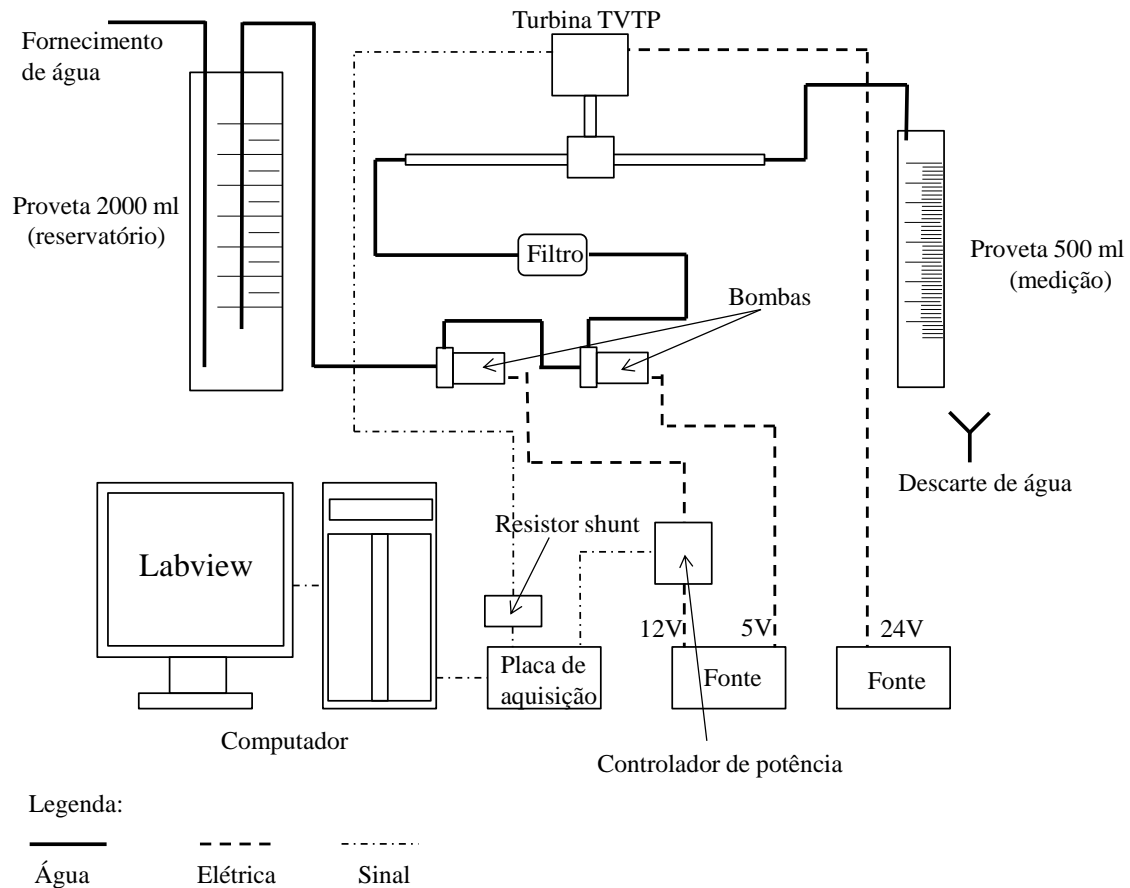


Figura 3.12. Esquema do experimento de teste e calibração da turbina do circuito da CAQ.

No circuito da Figura 3.12, a água é armazenada na proveta de 2000 ml sempre transbordada para manter o nível de água constante. Duas bombas ligadas em série enviam a água à turbina. Uma das bombas é conectada ao computador de modo a possibilitar o controle da vazão. A outra bomba é ligada em regime fixo para auxiliar no fornecimento de potência em vazões mais altas. A água que passa pela turbina é direcionada à proveta de 500 ml para cronometragem do tempo de enchimento. A água desta proveta de 500 ml é descartada após o enchimento para se efetuar outras cronometragens.

O sinal da turbina é transmitido em forma de corrente de 4 mA a 20 mA e convertido em valor de tensão por um resistor de precisão para possibilitar a leitura pela placa de aquisição de dados. Os dados da placa são fornecidos a um programa no computador, elaborado em Labview que registra o valor médio do número de amostra desejado e seu respectivo desvio padrão. Pode-se fixar um valor de corrente no controlador PID (proporcional, integral e derivativo), contido no programa que atua diretamente no acionamento da bomba.

Nas turbinas do circuito da piscina, foi realizada uma montagem das duas turbinas em uma instalação preexistente no laboratório de termo-hidráulica do CDTN. A Figura 3.13 apresenta um esquema da montagem realizada.

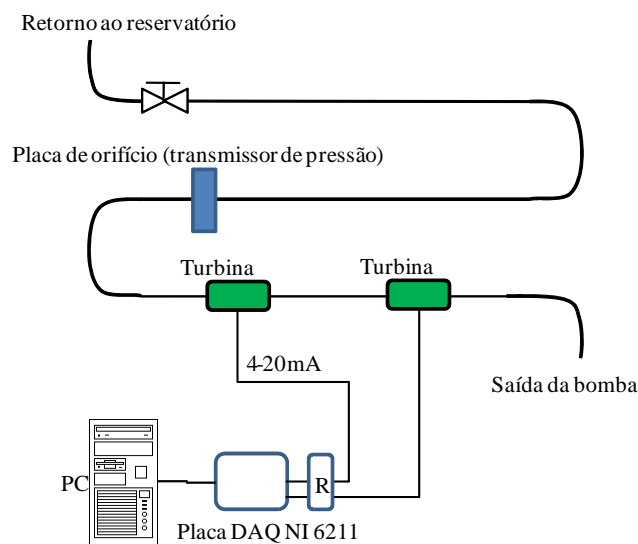


Figura 3.13: Esquema do teste das turbinas do circuito da piscina.

Nesta instalação, há uma placa de orifício ligada a um transdutor de pressão devidamente calibrado e conectado a um computador, que permite o registro da vazão e a sua comparação com os sinais de corrente das turbinas. Por meio do certificado do fabricante, que apresenta a relação entre corrente e vazão para os dois pontos extremos da medição da turbina, converteu-se o valor de corrente em vazão de registro das turbinas. Esta relação entre corrente e vazão aplicada é apresentada na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Relação entre corrente e vazão nas turbinas do circuito da piscina.

Corrente (mA)	Vazão (l/min)
4	0
20	100

### 3.3.3.2. Testes com os termopares.

Com o propósito de criar uma estratificação térmica semelhante à CAQ e capaz de testar a eficácia dos termopares na medição desta estratificação, utilizou-se um ebulidor comercial, inserido a aproximados 100 mm de profundidade na proveta de 2000 ml, cheia de água a temperatura ambiente, durante um curto período para aquecer apenas a porção de água em sua parte superior.

Para o teste dos termopares, foi montada uma sonda contendo 15 termopares, como a apresentada na Figura 3.11. Esta sonda foi imersa em uma proveta. O termopar mais acima na sonda foi inserido a uma profundidade de aproximados 10 mm e assim sucessivamente abaixo deste os demais termopares da sonda. Desta forma, a sonda pode registrar a temperatura em variados níveis ao longo da parte superior da proveta, captando a estratificação térmica.

### 3.3.4. Definição de um modelo numérico do experimento.

#### 3.3.4.1. Geometria.

Com base nas modificações da piscina propostas para se adequar ao experimento, obteve-se a geometria do modelo numérico do experimento apresentada nas Figuras 3.14 e 3.15. Para melhor representação do experimento, nenhuma simplificação na geometria foi realizada o que a torna uma reprodução fiel do projeto do experimento.

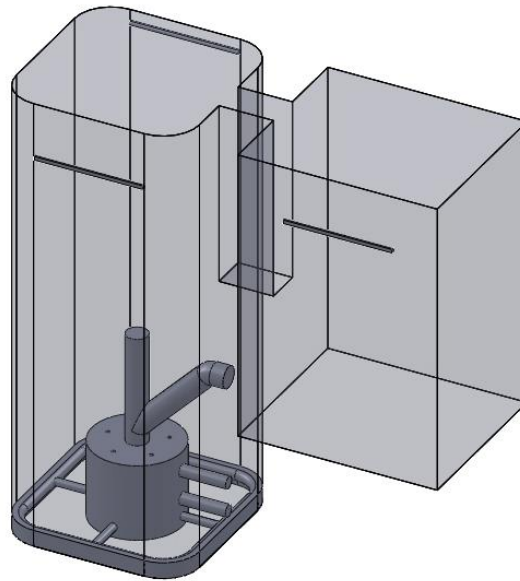


Figura 3.14: Vista em perspectiva da geometria aplicada no modelo do experimento.

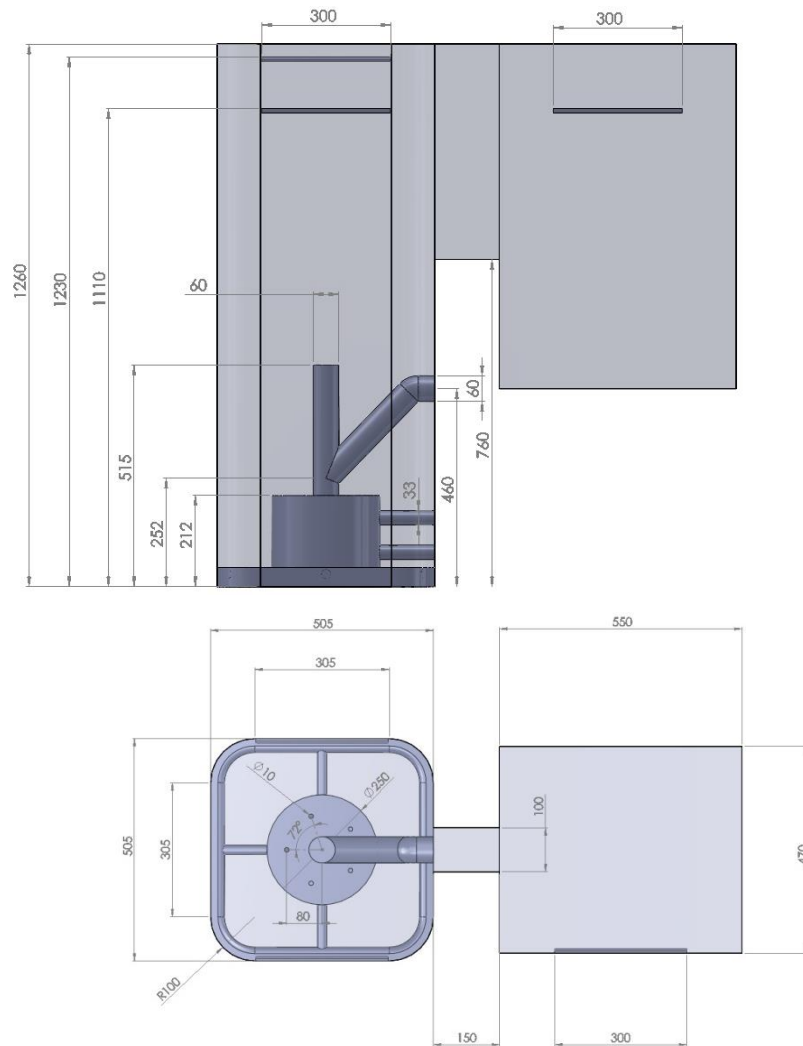


Figura 3.15: Vista de topo e elevação da geometria aplicada no modelo do experimento.

### 3.3.4.2. Teste de Malha.

Para se realizar o teste da influência da malha no resultado do cálculo numérico, foram geradas três malhas progressivamente refinadas. As malhas apresentam elementos tetraédricos e um refinamento local foi aplicado no topo da piscina.

Para definir um refinamento adequado em malhas é necessário utilizar um valor de comprimento de elemento de malha representativo, “ $h_i$ ”, dado pela Equação 3.10.

$$h_i = \left( \frac{\sum_{j=1}^{N_i} Vol_j}{N_i} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.10)$$

onde  $Vol_j$  é o volume do elemento de malha  $j$  e  $N$  é o total de elementos da malha  $i$ .

Para se obter um grau de refinamento constante entre as malhas, é utilizado um fator de refinamento  $r_i$ , apresentado pela Equação 3.11 que é a razão entre o  $h_{i+1}$  de uma malha mais grosseira pelo  $h_i$  da malha fina subsequente.

$$r_i = \frac{h_{i+1}}{h_i} \quad (3.11)$$

Os parâmetros das três malhas confeccionadas são apresentados na Tabela 3.8

Tabela 3.8: Parâmetros aplicados às malhas do modelo numérico do experimento.

Malhas	1	2	3
Nós	2 581 156	1 186 235	561 424
Elementos	11 182 329	4 767 603	2 096 085
Volume [ $m^3$ ]	0,51058	0,51058	0,51058
$h_i$ [m]	0,00357	0,00475	0,00625
$r_i$	1,32865	1,31512	

Na Figura 3.16, é apresentado o corte longitudinal da malha 2, a malha intermediária utilizada.

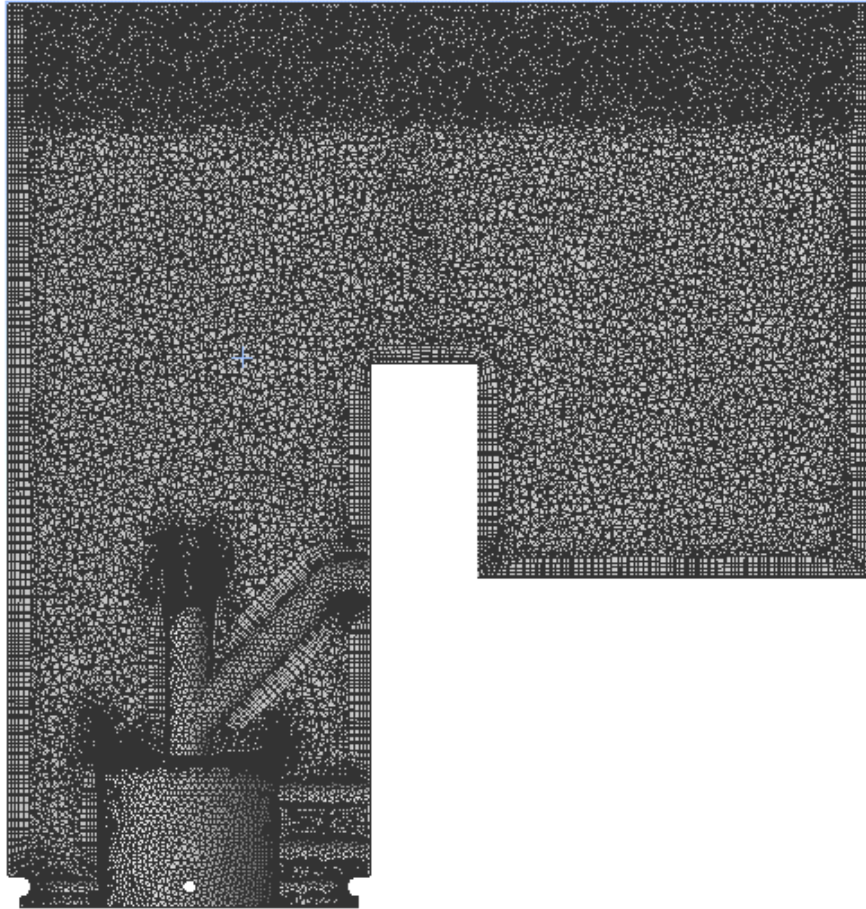


Figura 3.16: Vista em corte da malha 2 (intermediária) aplicada na simulação do modelo numérico do experimento.

#### **3.3.4.3. Condições de Contorno.**

As condições de contorno aplicadas ao modelo numérico se assemelham às aquelas aplicadas na análise dimensional do modelo reduzido da seção 3.2.3. Porém, os valores de vazão foram substituídos por valores de velocidades aplicados às faces correspondentes aos orifícios dos injetores da CAQ e do anel inferior da piscina. As velocidades aplicadas no modelo são apresentadas na Tabela 3.9.



Tabela 3.9: Condições de contorno aplicadas no modelo numérico do experimento.

Nome	Tipo	Velocidade [m/s]
CAQ	Entrada	0.0959
Piscina		0.8575
CAQ	Saída	0.0485
Chaminé		0.0933
Piscina		0.5377

#### 3.3.4.4. Parâmetros de Cálculo.

Os parâmetros de cálculos aplicados ao modelo foram os mesmos apresentados na seção 3.1.4 da simulação do protótipo do RMB, diferenciando pelo passo no tempo utilizado, que é apresentado na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Variação do passo no tempo e tempo total de simulação.

Etapa	Passo no tempo [s]	Número de passos	Tempo Simulado [s]
1 <sup>a</sup>	0.03162	14027	445
2 <sup>a</sup>	0.15	4671	700
3 <sup>a</sup>	0.3	5186	1556

Esta variação do passo no tempo em cada instante da simulação se deve ao prévio conhecimento do comportamento numérico da simulação, obtido pelo modelo em escala reduzida do RMB, e uma forma de padronização para a simulação das três malhas de modo a se obter um total de 45 minutos. Esta padronização é necessária para que o passo no tempo não interfira no resultado, onde o propósito é puramente a análise da influência da malha.

#### 3.3.4.5. Métodos de análise.

O método utilizado é análogo ao do item 3.2.5, onde os parâmetros utilizados para comparação no teste das malhas é a espessura da CAQ e o perfil de temperatura. Esta espessura é obtida pela determinação do ponto de gradiente de temperatura máximo ao

longo das linhas apresentadas na Figura 3.17, sendo a espessura adotada a média das 7 linhas.

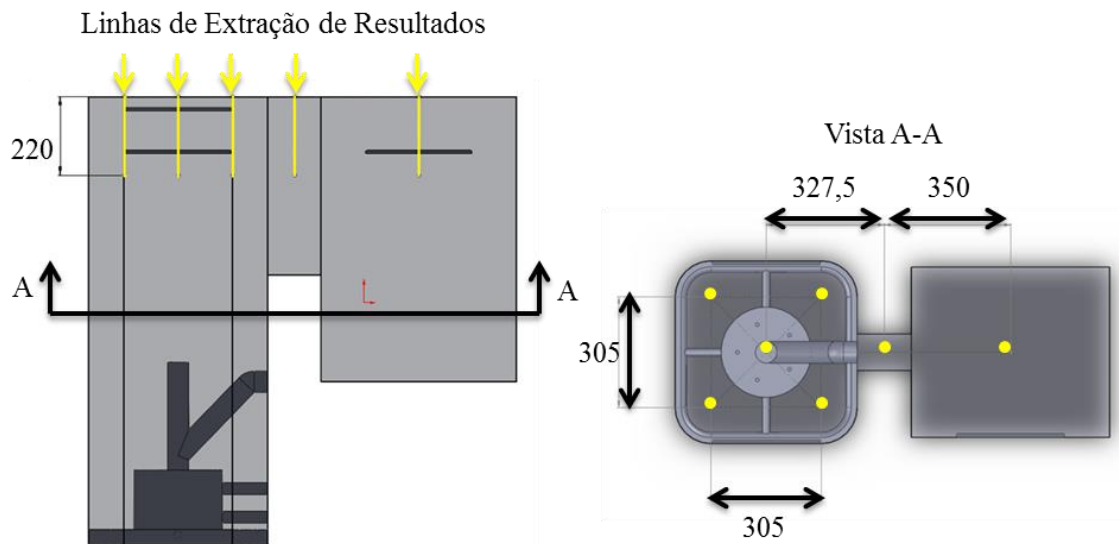


Figura 3.17: Linhas aplicadas na análise da temperatura na CAQ do modelo numérico do experimento.

O outro propósito da análise do modelo numérico está na sua interação com o projeto do experimento, onde a simulação numérica auxilia na verificação da eficiência e eficácia dos instrumentos de medida adotados.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. MODELO NUMÉRICO DO PROTÓTIPO DO RMB.

O gráfico da Figura 4.1 apresenta a variação da taxa de dose de radiação teórica na superfície da piscina do reator durante a operação para as potências de aquecimento e temperatura inicial da piscina simulada.

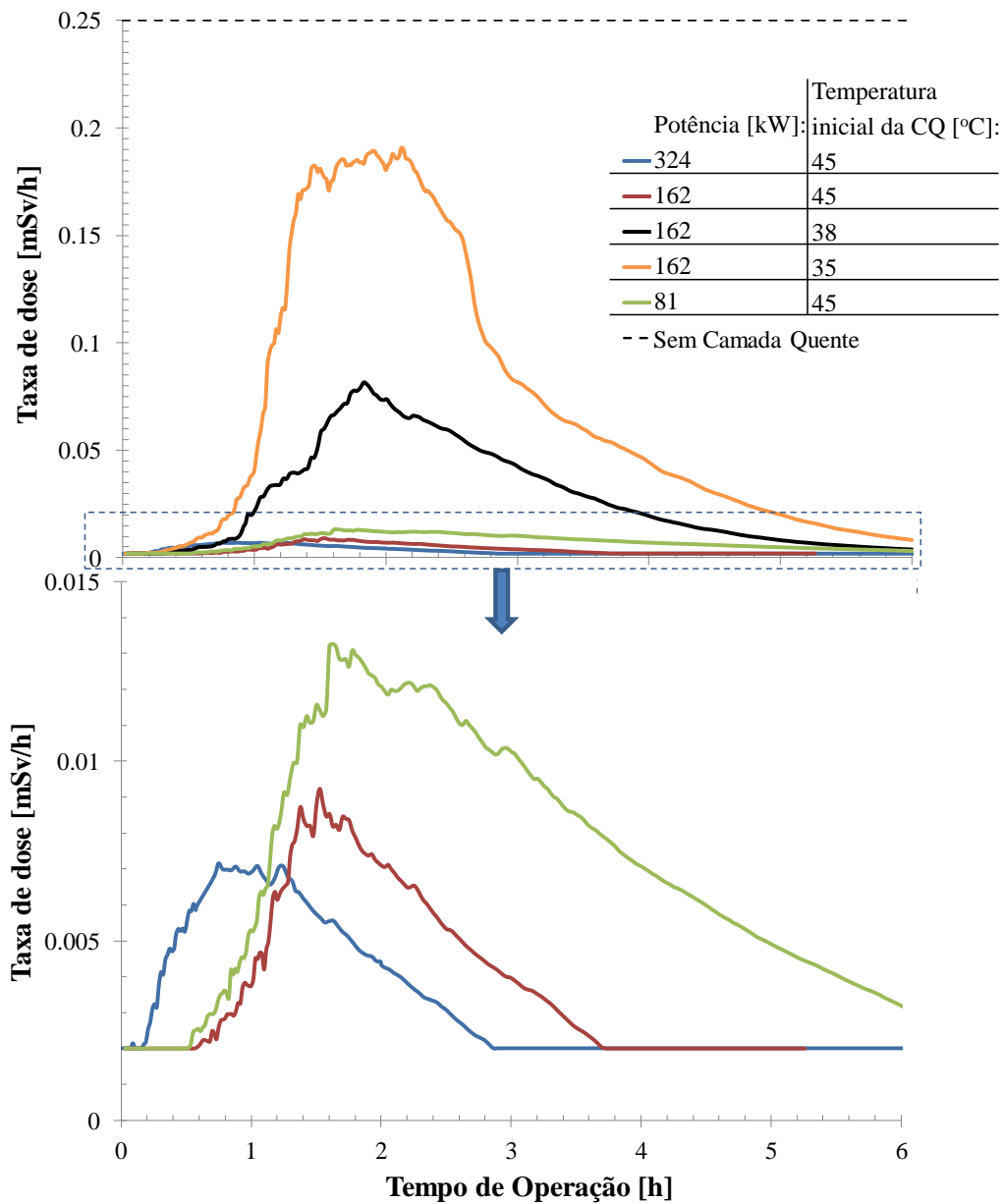


Figura 4.1: Taxa de dose de radiação teórica na superfície da piscina do RMB. Detalhe dos baixos valores de taxa de dose de radiação no gráfico inferior.

Observa-se que a maior emissão de radiação na superfície da piscina corresponde ao período entre a primeira e a segunda hora de operação. Neste período, a água injetada pelo circuito de refrigeração da piscina, a uma temperatura superior à piscina atinge a CAQ causando uma mistura em sua parte inferior e reduzindo a sua espessura. Após este período, as temperaturas da piscina e da água injetada pelo seu circuito de refrigeração se estabilizam, permitindo que a CAQ volte a se desenvolver, reduzindo a taxa de dose de radiação na superfície da piscina. A Figura 4.1 revela uma variação de 28 vezes entre o valor para CAQ formada a 45°C com o aquecedor de 324 kW e a formada a 35 °C com o aquecedor de 162 kW.

A Tabela 4.1 apresenta a taxa de dose média no intervalo de 6 horas desde o início da operação do RMB. Esta situação de operação de partida do reator apresenta a situação de maior emissão por parte da piscina do reator.

Tabela 4.1: Taxa de dose média durante o ligamento do RMB.

Temp CAQ [°C]	Pot. aquecedor [kW]	Taxa de dose de radiação média[mSv/h]
45	324	0,00352
	162	0,00414
	81	0,00714
38	162	0,02813
35	162	0,08004

Tomando como base o reator *OPAL* que opera em ciclos de 30 a 35 dias, 8 vezes ao ano (ANSTO, 2011), estimou-se na Tabela 4.2 a dose anual para cada configuração da CAQ, através da Equação 4.1.

$$S_{anual} = \bar{S}_{inicial} \cdot 6[h] \cdot 8[acionamentos] + 0,002[mSv/h] \cdot (210^* - 8)[dias] \cdot 6*[h/dia] \quad (4.1)$$

\*Valores estimados

Estes valores estimados levaram em conta uma aproximação do número de dias trabalhados e o tempo em que o operador se expôs à piscina do reator, sendo 8 destes durante o acionamento do reator.

Tabela 4.2: Estimativa da dose anual na superfície da piscina do RMB.

Temp CAQ [°C]	Pot. aquecedor [kW]	Dose anual[mSv/ano]
45	324	2,593
	162	2,623
	81	2,767
38	162	3,774
35	162	6,266

Analisando a dose anual para as configurações propostas na Tabela 4.2, verifica-se que em todas as situações a CAQ foi suficiente para abaixar a dose a níveis adequados, abaixo do valor de 20 mSv/ano estabelecido em norma. Porém, nesta simulação a metodologia de cálculo da blindagem promovida pela CAQ se deve apenas à espessura da CAQ, tomada como base a interface entre esta e a água da piscina, desprezando-se a eventual presença de água contaminada na CAQ que pode vir a ocorrer devido à mistura de água da piscina com a água da CAQ.

Apesar da CAQ a 35 °C teoricamente garantir uma dose adequada, recomenda-se adotar uma temperatura inicial da CAQ de 45°C, para evitar a mistura da camada com a água da piscina.

A potência do aquecedor do sistema da CAQ, de 81 kW foi capaz de produzir e manter a CAQ, provando que não há necessidade de uma maior potência de aquecimento, sendo o fator determinante para a estratificação a temperatura de formação da camada.

O sistema da CAQ é um circuito necessário à proteção do ambiente externo ao reator e, por isso, deve ser dimensionado com redundância. Assim, recomenda-se a utilização de dois aquecedores de 81 kW que podem ser utilizados em conjunto para a formação da CAQ, com 162 kW de potência térmica. Desta forma é garantido que na falha de um aquecedor o outro é capaz de gerar e manter a CAQ no reator conforme os resultados indicam.

## 4.2. MODELO NUMÉRICO EM ESCALA DO PROTÓTIPO DO RMB.

O gráfico da Figura 4.2 apresenta a espessura média da CAQ durante a simulação do protótipo e do modelo reduzido.

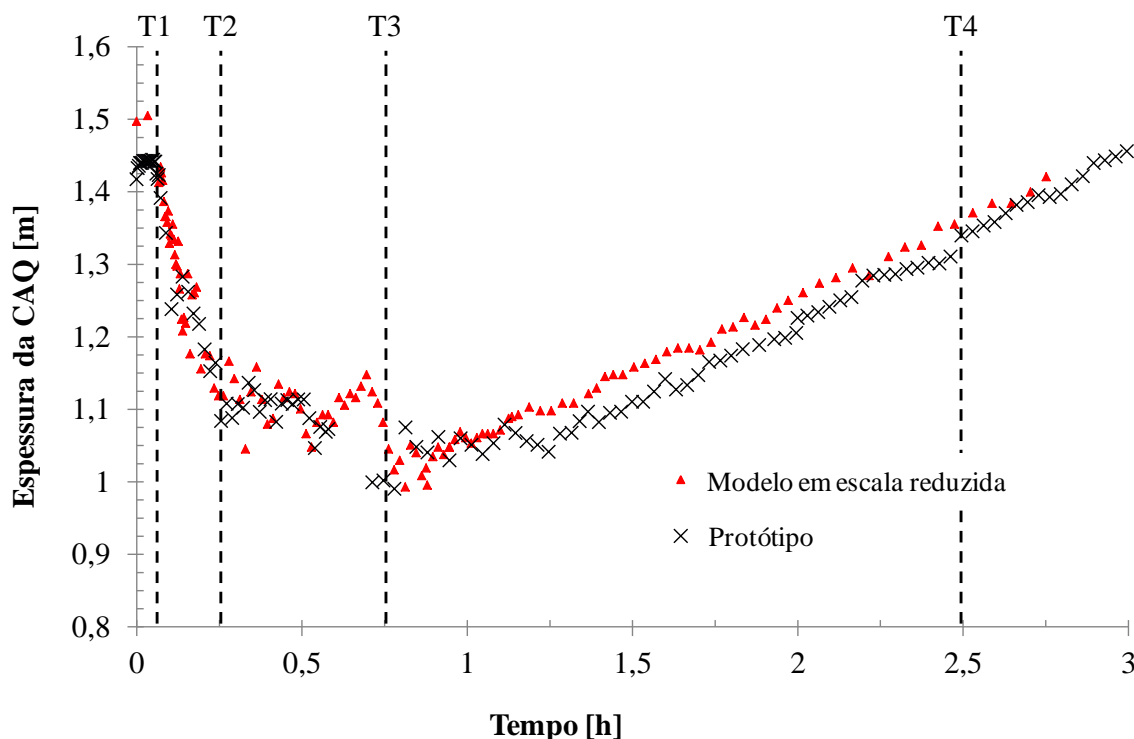


Figura 4.2: Comparação do comportamento da CAQ entre o modelo em escala reduzida e o protótipo durante a simulação de ligamento do reator.

No gráfico da Figura 4.2, o valor do eixo do tempo para o modelo em escala reduzida foi multiplicado por  $\sqrt{10}$ , conforme Equação 3.9 e a sua espessura por 10, conforme Equação 3.6. Esta modificação na escala do gráfico se dá para permitir a comparação direta entre as duas simulações em um único gráfico.

O critério para se determinar a altura da CAQ, foi a posição média das linhas ao longo do eixo Z onde ocorre o maior gradiente de temperatura ( $\partial T/\partial Z$ ), caracterizando a interface da estratificação.

Observa-se no gráfico da Figura 4.2 que as duas simulações apresentam o mesmo comportamento de variação de espessura da CAQ. Este comportamento pode ser dividido, para melhor análise, em quatro intervalos. Cada um destes intervalos representa um estágio de comportamento da CAQ durante a simulação do transiente inicial de ligamento do reator e podem ser observados na Tabela 4.3 e na Figura 4.3.

Tabela 4.3: Intervalos de análise do escoamento da CAQ.

Intervalo	Comportamento CAQ	Duração do intervalo [h]
T1	Estratificada	0.000 - 0.083 (5 minutos)
T2	Forte perturbação	0.083 - 0.250 (15 minutos)
T3	Oscilante	0.250 - 0.750 (45 minutos)
T4	Recuperação constante	0.750 - 2.500 (150 minutos)

Após 5 minutos em que a CAQ permanece sem perturbações, inicia-se um processo de perturbação da camada resultante da ascensão de água aquecida proveniente do circuito de refrigeração da piscina durante aproximados 15 minutos. A partir deste momento, a água da piscina passa a esquentar, reduzindo o efeito do circuito de refrigeração da piscina. Porém, a camada apresenta uma oscilação. Neste intervalo a CAQ atinge sua menor espessura de aproximadamente 1,0 m. Após 45 minutos tanto a piscina quanto a CAQ estão com a temperatura estabilizada, passando a retomar seu crescimento de forma linear a uma taxa de 0,17 m/h em sua espessura. A Figura 4.3 apresenta em um plano transversal o perfil de temperatura na piscina nos quatro intervalos para as duas simulações.

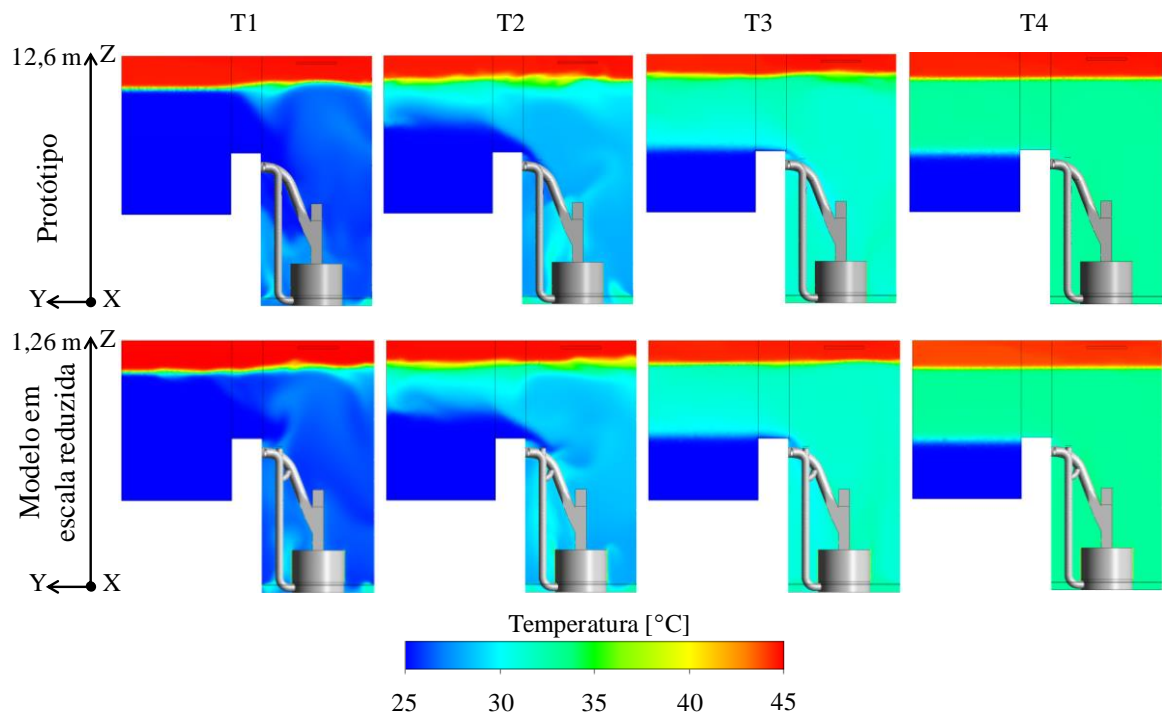


Figura 4.3: Comparação do perfil de temperatura da simulação do protótipo e do modelo em escala reduzida.

Maiores detalhes comparativos podem ser observados na Figura 4.4 pelo perfil médio de temperatura na região da CAQ nos quatro intervalos analisados. Observa-se que mesmo no intervalo T2 e T3 em que ocorrem as perturbações na CAQ, o perfil indica forte estratificação. A semelhança de perfil entre as duas simulações indica que o modelo em escala reduzida consegue reproduzir bem os fenômenos presentes na piscina do reator.



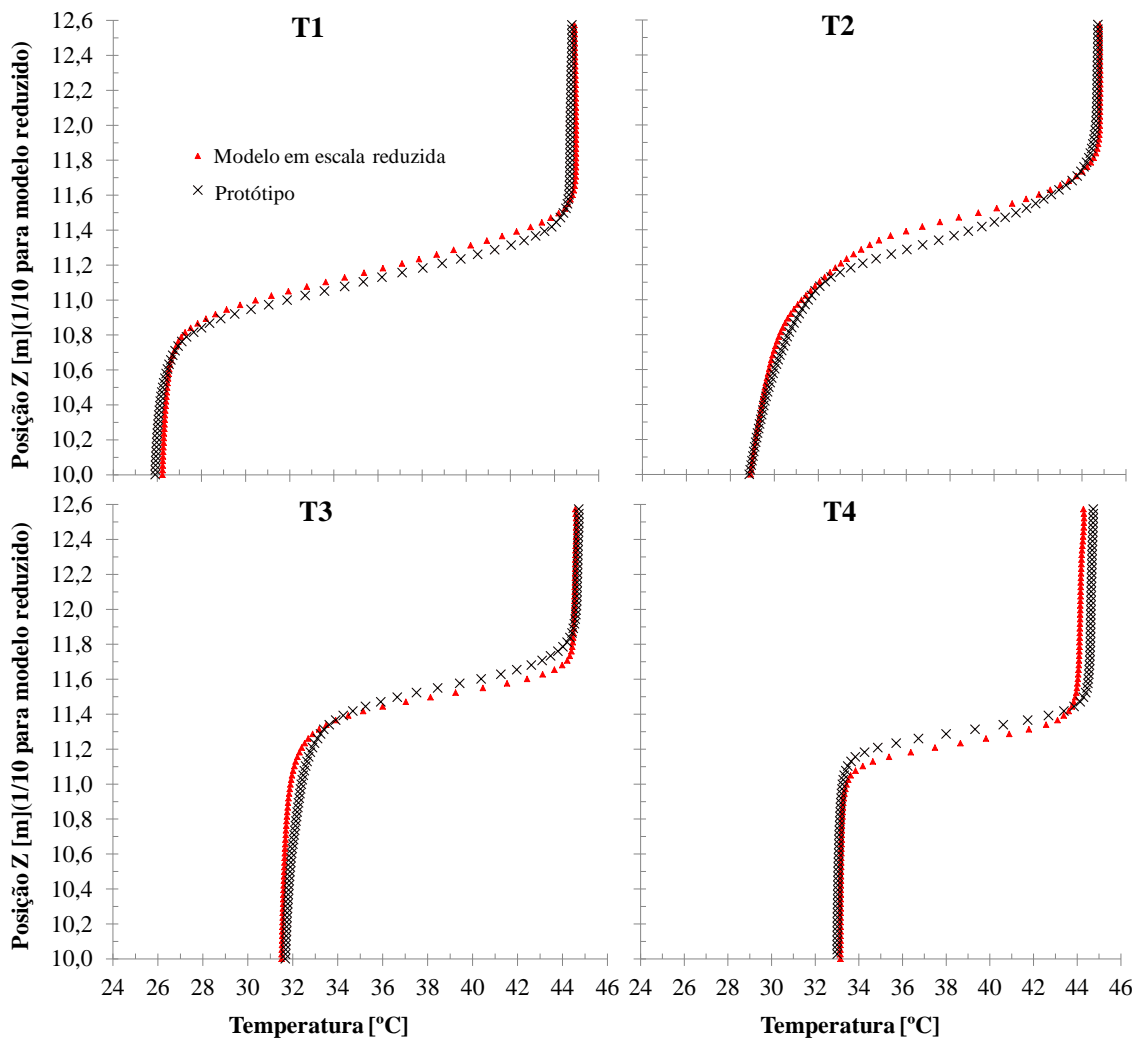


Figura 4.4: Comparação entre o perfil de temperatura do protótipo e do modelo em escala reduzida.

Na Figura 4.5 é realizada uma comparação entre a variação de densidade entre as simulações. Esta variação de densidade se refere à diferença entre o valor da densidade média correspondente a cada um dos níveis vertical pelo nível consecutivo dividido pelo seu próprio valor. Os picos horizontais indicam onde ocorre a estratificação térmica e a sua intensidade. Embora os picos não sejam coincidentes, observa-se que os comportamentos nos intervalos são semelhantes. No intervalo T3 os picos situam-se próximos a altura 11,6 m que corresponde a menor espessura 1,0 observado no gráfico da Figura 4.2.

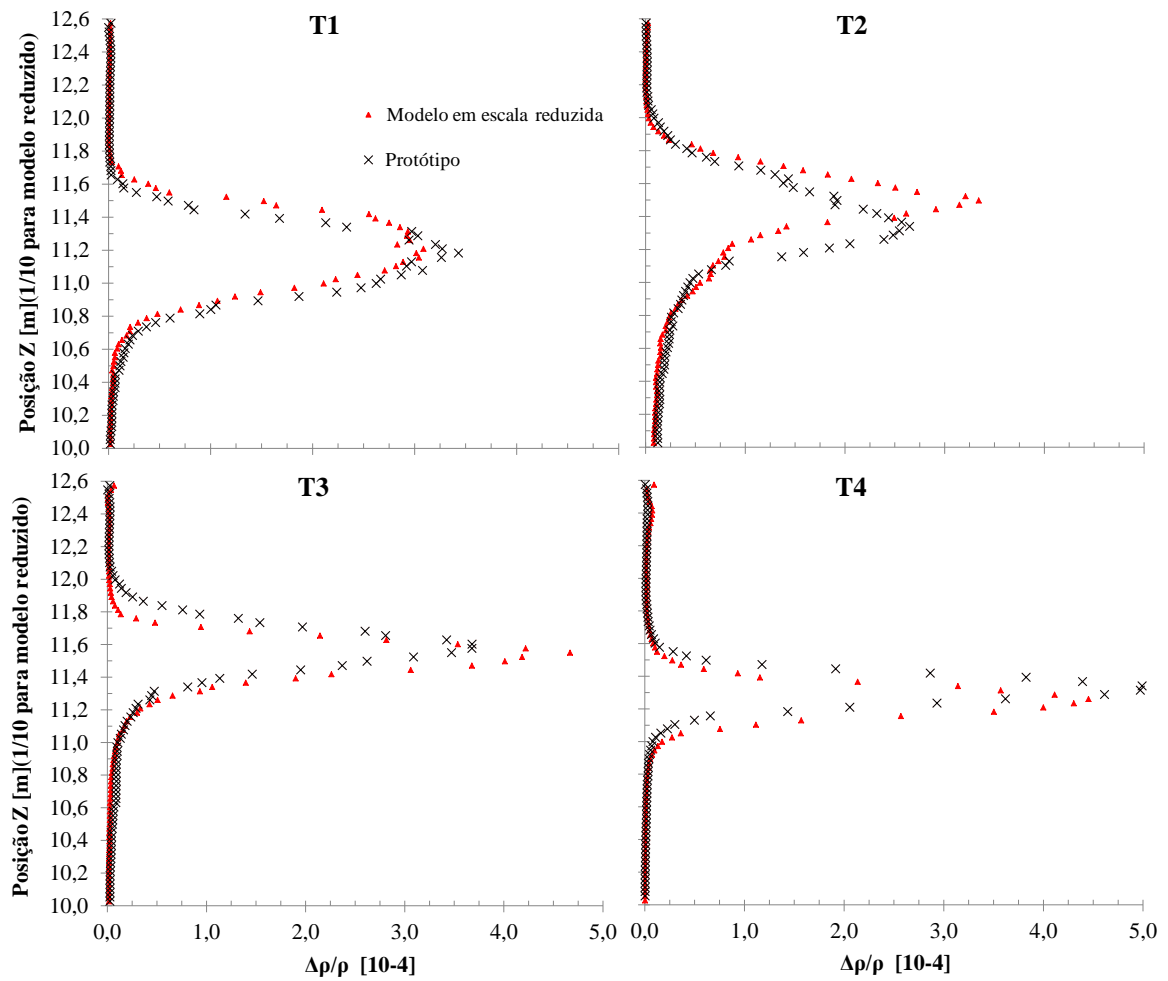


Figura 4.5: Comparação entre o perfil de variação de densidade entre as simulações do protótipo e do modelo em escala reduzida.

O gráfico da Figura 4.6 apresenta o perfil da velocidade média transversal, perpendicular ao eixo Z. O valor da velocidade para o modelo em escala reduzida foi dividido por  $\sqrt{10}$  de acordo com Equação 3.7 de modo a permitir a comparação direta das duas simulações. Devido à turbulência na piscina e aos rápidos transientes, é difícil obter o mesmo perfil entre os modelos. Porém, observa-se nos quatro intervalos que o valor da velocidade próximo à região estratificada aproxima-se de 0 m/s, o que indica escoamento nulo de água na região. No intervalo 4, observa-se que devido ao aquecimento da piscina, a velocidade transversal aproxima-se de zero indicando a ausência do escoamento convectivo na piscina.

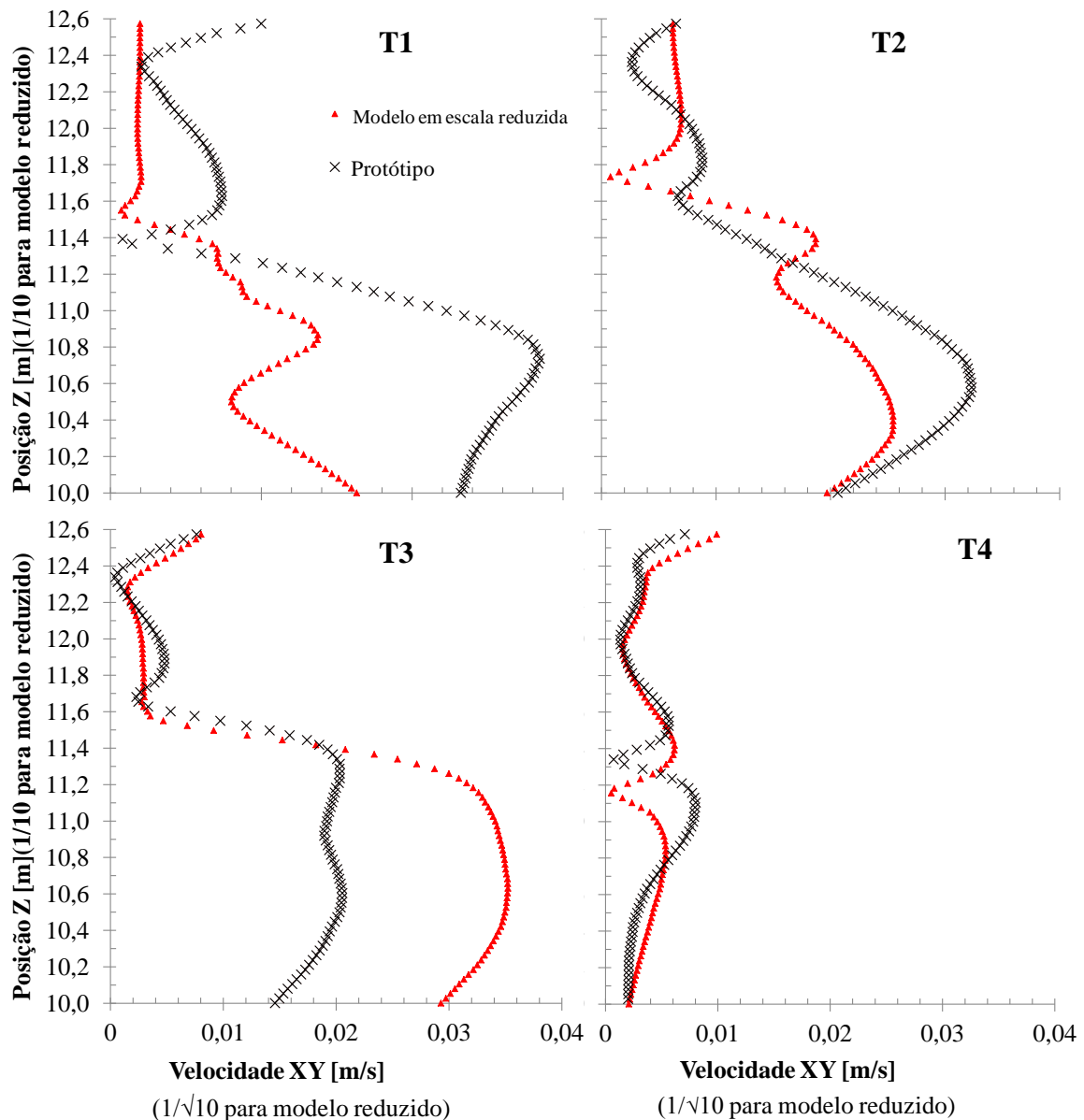


Figura 4.6: Comparação do perfil de velocidade entre a simulação do protótipo e do modelo em escala reduzida.

O gráfico da Figura 4.7 apresenta o perfil do número de Froude nos quatro intervalos. Este perfil foi obtido juntando-se o perfil da variação de densidade com o perfil da velocidade transversal de acordo com a Equação 3.4. O número de Froude apresentou grande variação, com valores da ordem de  $10^{-3}$  em regiões afastadas da zona de estratificação e de  $10^{-9}$  na zona de estratificação. Uma escala logarítmica foi utilizada para possibilitar a visualização desta grande variação do Número de Froude. Mesmo com valores bem distintos, devido a

grande variação de velocidade, observa-se na região da estratificação uma similaridade e um mesmo comportamento qualitativo.

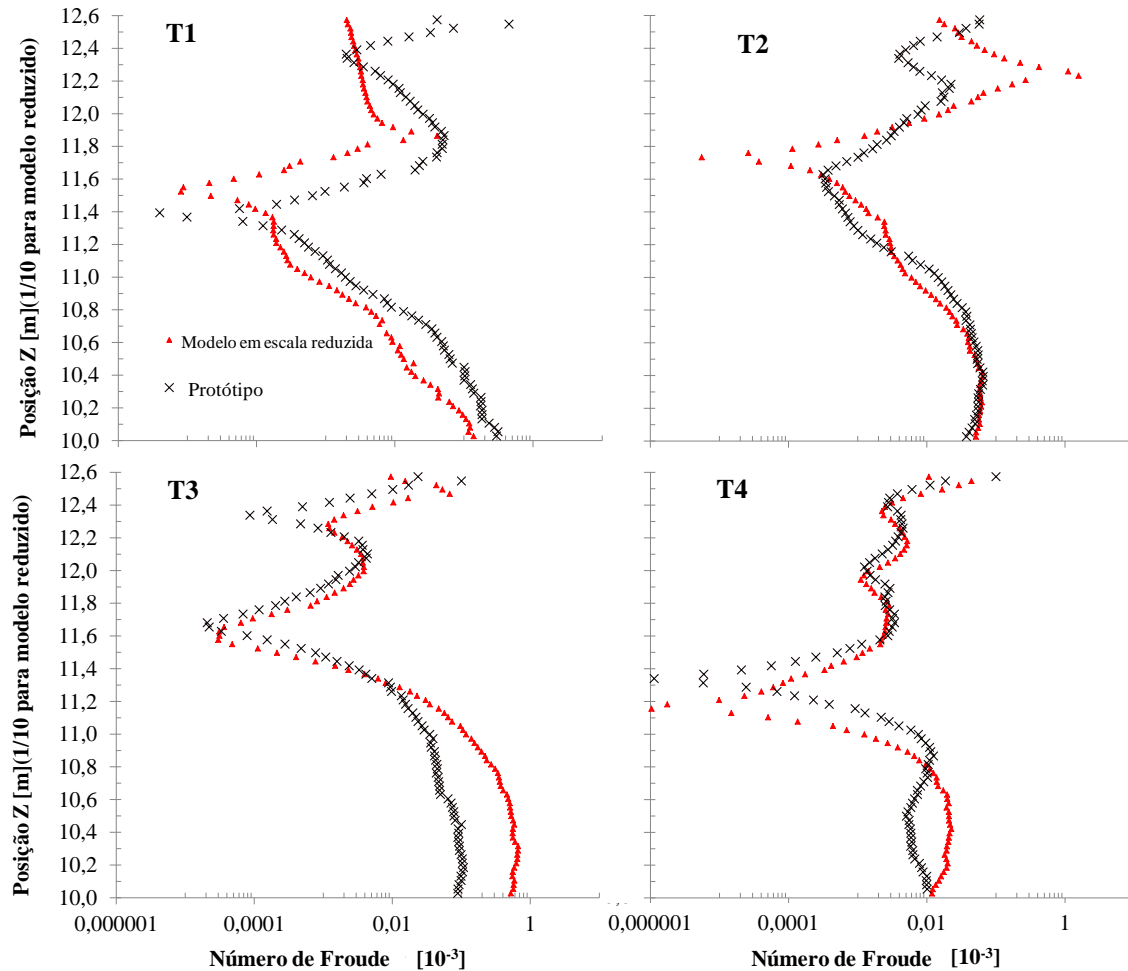


Figura 4.7: Comparação do perfil do número de Froude entre as simulações do protótipo e do modelo em escala reduzida.

### 4.3. EXPERIMENTO EM ESCALA

Baseando-se no projeto construtivo da Figura 3.9 e no fluxograma da Figura 3.10, construiu-se uma bancada experimental para os estudos da CAQ. Esta bancada encontra-se inoperante, aguardando a ligação dos instrumentos e alimentação elétrica dos equipamentos. A Figura 4.8 apresenta seu estado atual de construção.



Figura 4.8: Estado atual da bancada experimental.

Mesmo inacabada, apresenta-se a bancada por ser resultado dos estudos numéricos em escala do reator, onde todo conhecimento teórico se converteu em uma instalação capaz de reproduzir os fenômenos da CAQ.

#### **4.3.1. Testes dos instrumentos aplicados ao experimento.**

O gráfico da Figura 4.9 apresenta a comparação entre os dados do fabricante da turbina TVTP (Tecnofluid, 2012) e a calibração realizada no laboratório.

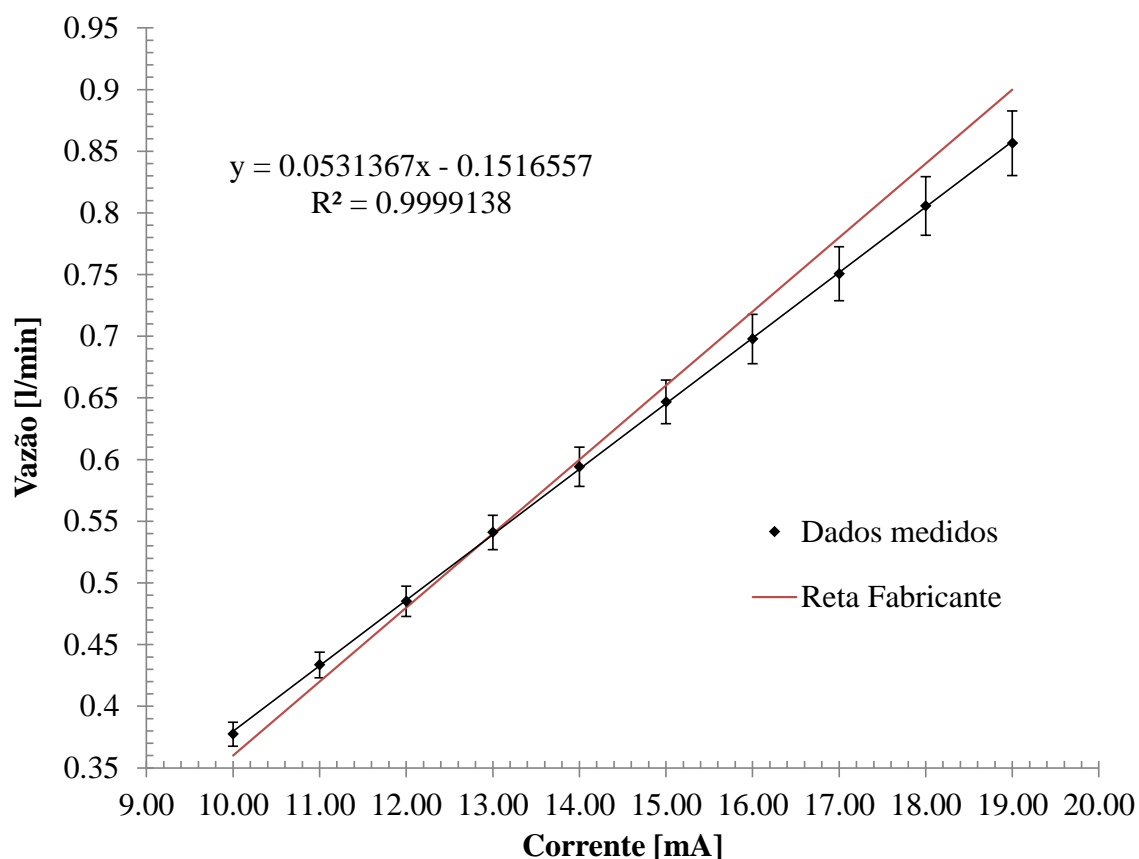


Figura 4.9: Comparação do levantamento da calibração da turbina TVTP com os dados do fabricante.

Na Figura 4.9 observa-se uma diferença de inclinação entre as duas curvas e as respectivas incertezas das medições realizadas. Devido aos cuidados tomados no procedimento de calibração no laboratório e à falta de conhecimento dos procedimentos adotados pelo fabricante, foram aplicados na medição de vazão da turbina os dados obtidos pelo experimento, mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Dados aplicados na medição da turbina.

Vazão [l/min]= A*Corrente + B		Incerteza relativa nominal
A [l.min <sup>-1</sup> /mA]	B [lmin <sup>-1</sup> ]	%
0.0531367	-0.1516557	3.05

No gráfico da Figura 4.10, comparou-se a leitura das duas turbinas SLVT (Contech, 2013) em relação ao medidor por placa de orifício do laboratório de termo-hidráulica do CDTN.

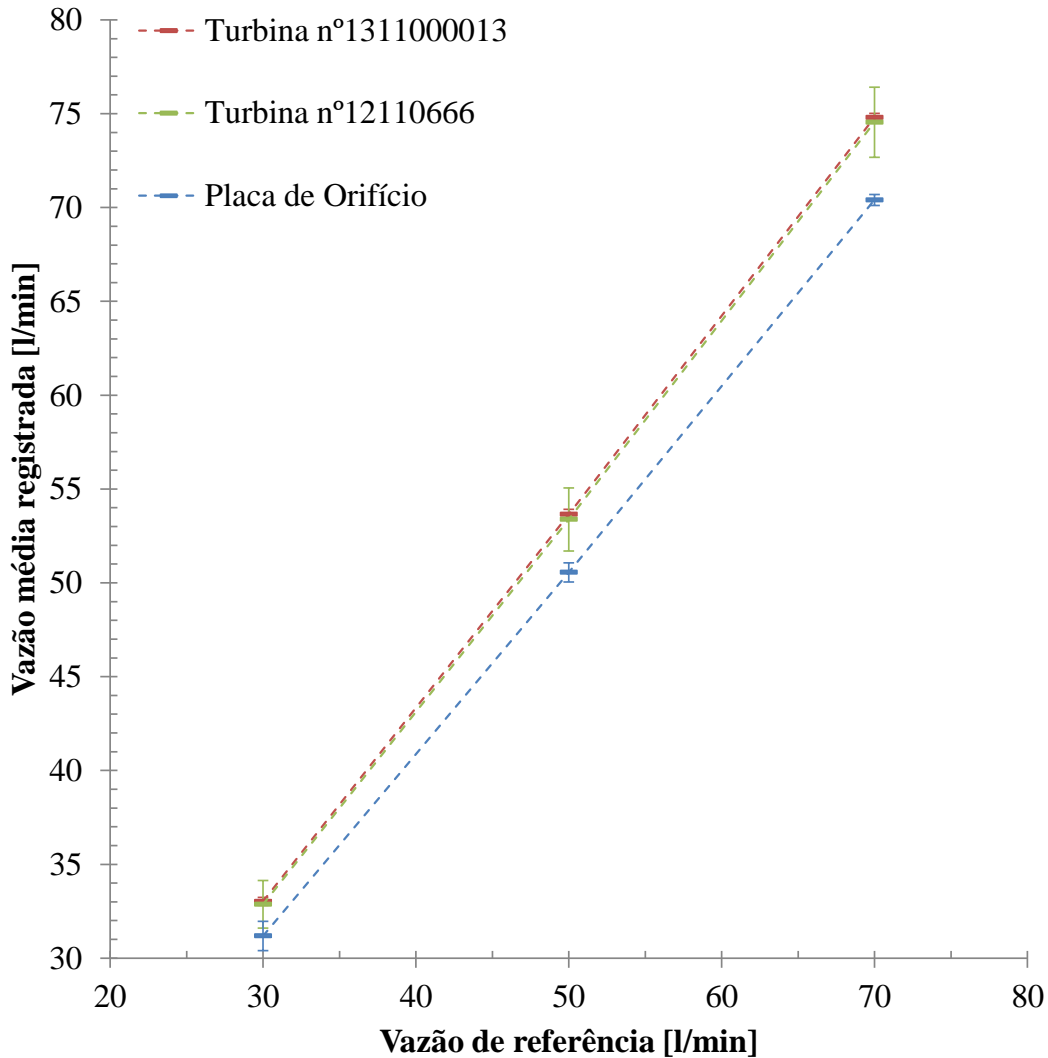


Figura 4.10: Comparação entre as vazões medidas pelas turbinas SVLT e o medidor por placa de orifício.

No gráfico da Figura 4.10, configuraram-se as duas turbinas com os valores apresentados na Tabela 3.4. Comparando as três medições de vazão utilizadas nas faixas de 30, 50 e 70 l/min, observou-se que as turbinas apresentam uma defasagem linear e outra angular em relação à placa de orifício, o que gera questionamento quanto a sua confiabilidade no experimento. Outro problema detectado foi a grande oscilação do sinal da turbina que resultou em uma incerteza de medição maior que a da placa de orifício, o que desqualifica

esta turbina como medidor adequado ao experimento. Este teste levou a necessidade de uma reavaliação da adequação das turbinas e sua calibração junto ao fabricante.

O gráfico da Figura 4.11 apresenta o perfil de temperatura obtido pelo aquecimento de água no topo da proveta de 2000 ml em duas situações, uma inicial com a camada bem estratificada e outra após ser induzida forte oscilação na camada estratificada pelo movimento da sonda de termopares.

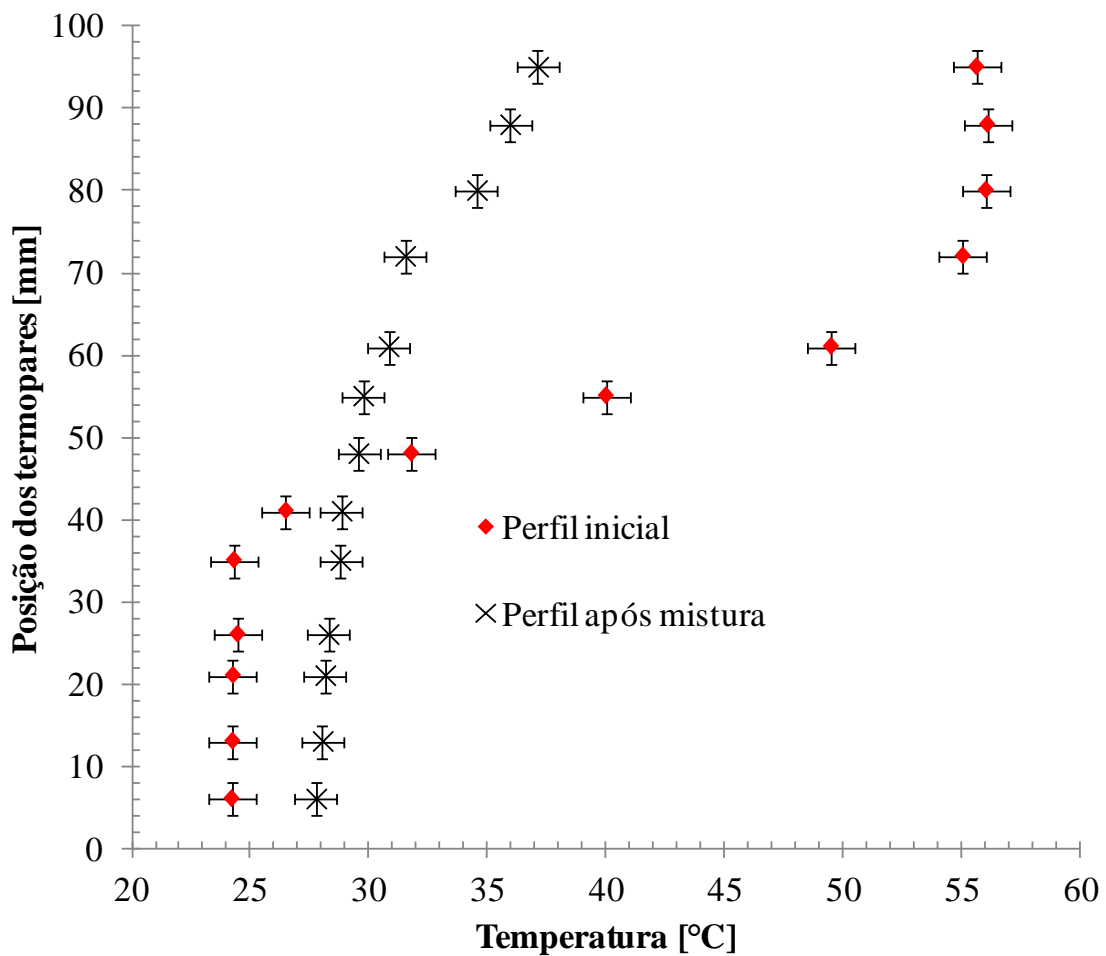


Figura 4.11: Perfil de temperatura obtido pela sonda com 13 termopares.

No gráfico da Figura 4.11, foi utilizada a incerteza determinada pelo fabricante do termopar tipo T de  $\pm 1^\circ\text{C}$ , pois no presente experimento não foram aplicadas as curvas de calibração do termopar obtidas no laboratório. Para a posição dos termopares, em relação a sua profundidade na proveta, adotou-se uma incerteza de  $\pm 2$  mm.



Observa-se que a sonda foi capaz de reproduzir o forte gradiente térmico da CAQ, captando variações térmicas entre 24°C e 55°C. Assumindo-se o perfil de temperatura na região da estratificação como uma reta entre os pontos extremos desta região, chegou-se a um gradiente de 0,89°C/mm. Após sua mistura, registrou-se a destruição da estratificação térmica. O gráfico apresenta uma curva mais suave variando entre 28°C e 38°C. Considerando-se o perfil de temperatura na região de maior estratificação como uma reta, obteve-se um gradiente de 0,24 °C/mm.

Mesmo apresentando bons resultados quantitativos, o gráfico da Figura 4.11 não foi utilizado para se realizar a validação dos cálculos numéricos, pois não houve um rígido controle das condições de contorno do experimento, tais como temperatura e profundidade da camada e velocidade de agitação da sonda, que possibilitasse a reprodução numérica do experimento.

#### **4.3.2. Simulações numéricas do experimento.**

O gráfico da Figura 4.12 apresenta a espessura média da CAQ obtida por simulação numérica do experimento para as três malhas testadas, comparando-as à espessura obtida com os dados do modelo reduzido do gráfico da Figura 4.2.

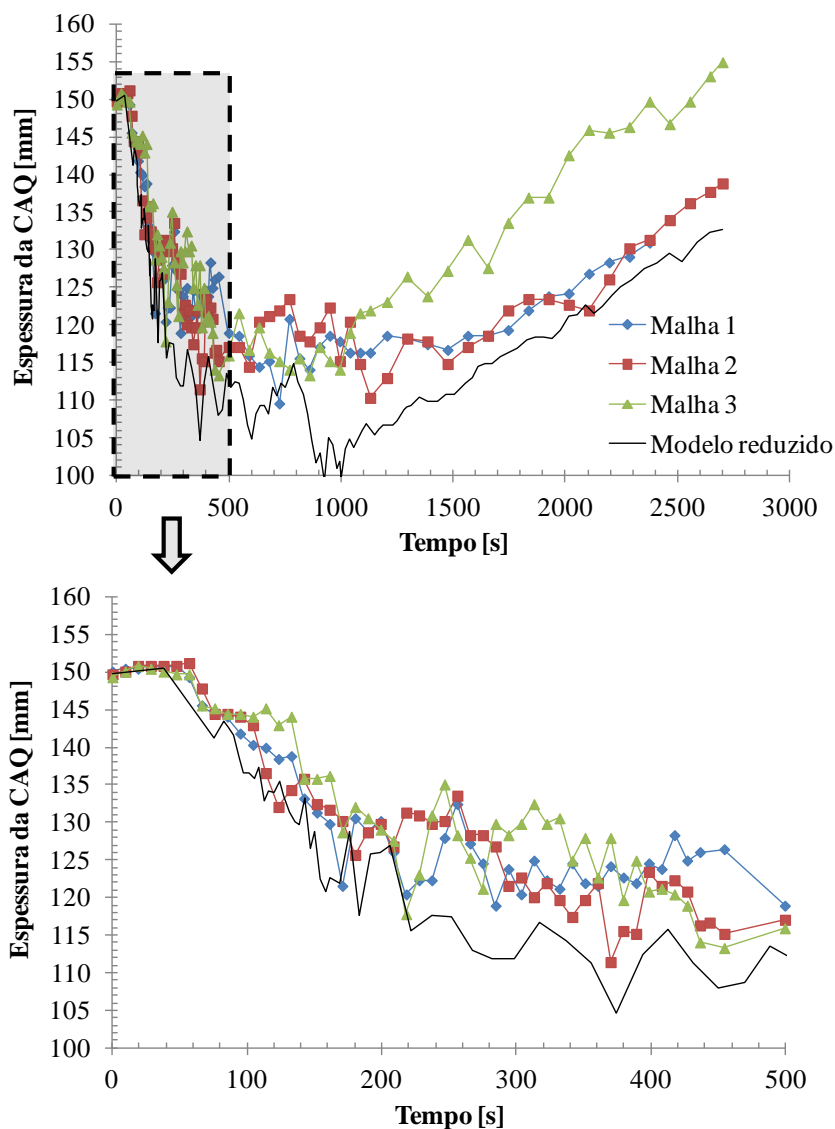


Figura 4.12: Gráficos da variação da espessura da CAQ para três malhas distintas. Detalhe da oscilação no período inicial no gráfico inferior.

Observa-se no gráfico da Figura 4.12 que para as três malhas, o comportamento até os primeiros 1000 segundos são similares, com os valores oscilando dentro de uma mesma faixa.

Após 1000 segundos, a CAQ começa a se restabelecer. Neste período nota-se a influência da malha no resultado da simulação, tendo a malha 3, que apresenta menor número de nós, apresentado um crescimento mais rápido, de aproximados 0,027mm/s contra 0,017mm/s para as demais malhas. Comparando as malhas 1 e 2, observa-se que apesar de apresentarem diferenças nas oscilações, o comportamento da variação da espessura da

CAQ é similar. Os gráficos da Figura 4.13 apresentam os perfis de temperatura para os quatro instantes indicados no gráfico da Figura 4.12, em que a CAQ apresenta diferentes estágios de comportamento.

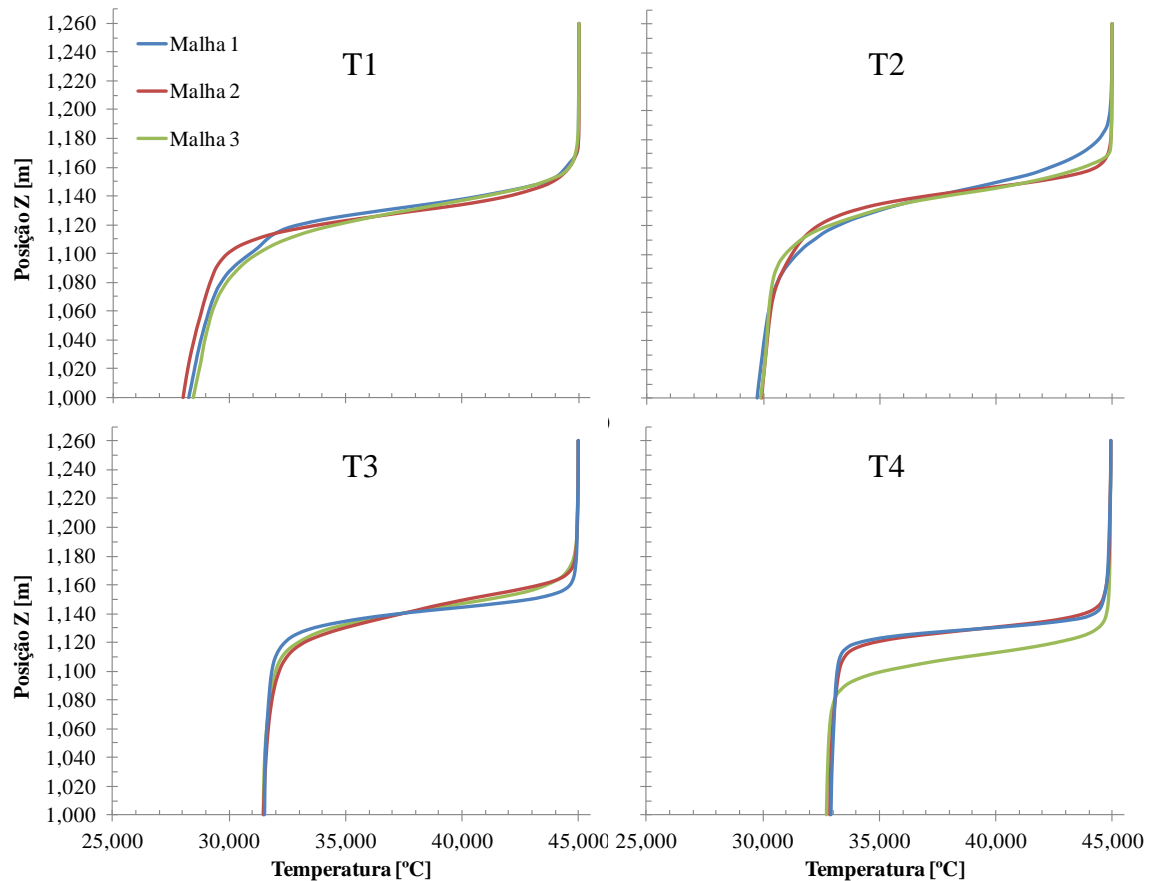


Figura 4.13: Gráfico do perfil de temperatura para três malhas distintas.

Observa-se nos gráficos da Figura 4.13 que os perfis das três malhas se assemelham nos instantes T1 a T3, apresentando diferenças mínimas. No instante T4, verifica-se que para a malha 3, que é a mais grossa, apresentou uma diferença no perfil de estratificação. A profundidade obtida foi de aproximadamente 1,20 metros contra 1,40 metros para as outras malhas. Esta diferença indica uma recuperação mais rápida da CAQ.

Para avaliar a efetividade da utilização de uma sonda de termopares posicionada na parte central do tanque, foi comparado o perfil de temperatura nesta posição com o perfil médio obtido das 7 linhas apresentadas na Figura 3.17. Esta comparação é apresentada nos gráficos da Figura 4.14.

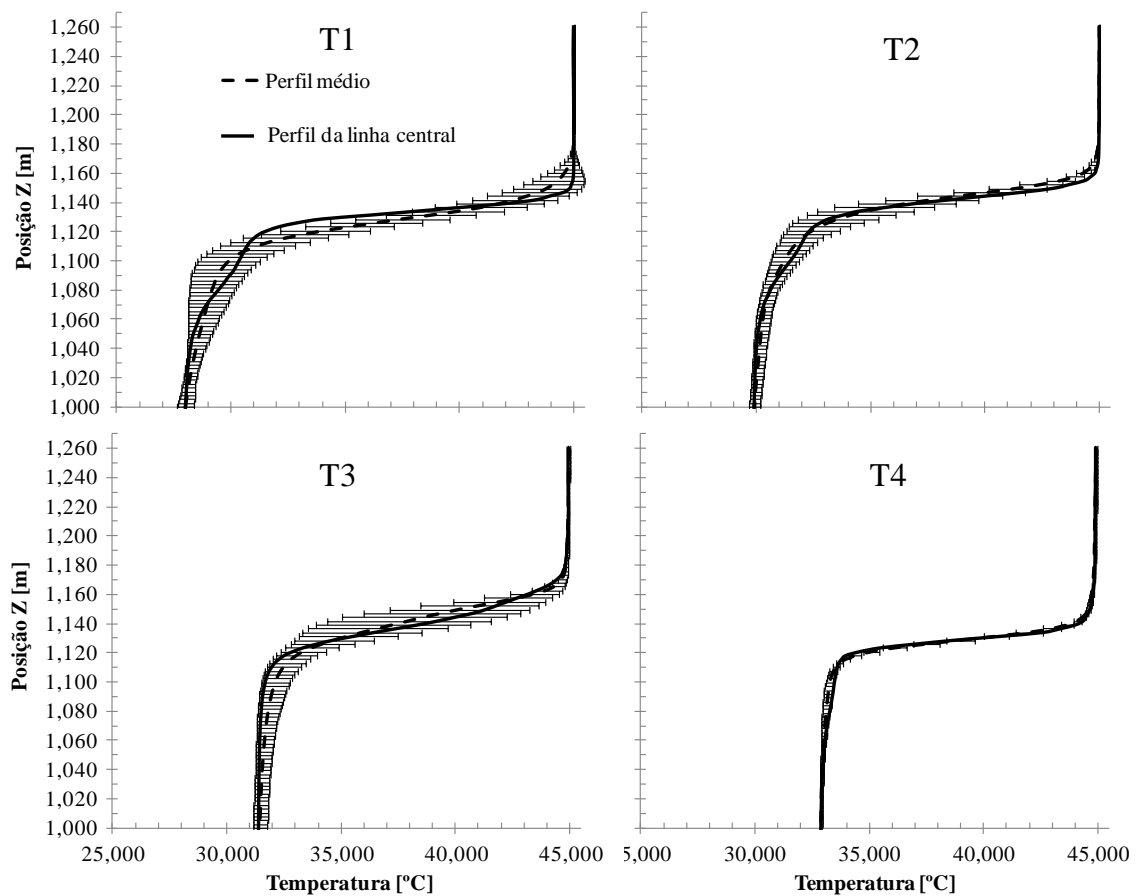


Figura 4.14: Comparação entre o perfil de temperatura no centro do tanque, perfil médio e desvio padrão.

Nos gráficos da Figura 4.14 o perfil apresentado corresponde ao da malha 2 da Figura 4.13. As barras horizontais indicam o desvio padrão relativo às medições obtidas das 7 linhas. Nos instantes T1 a T3, observa-se que o perfil central se difere do perfil médio, apresentando um desvio padrão alto de até aproximados  $2^{\circ}\text{C}$ . Esta diferença se deve às oscilações ocorridas na CAQ durante estes instantes. No instante T4, não há mais oscilações significativas, assim o perfil médio se aproxima do perfil central e o desvio padrão se aproxima de zero. Mesmo que o perfil central não seja uma amostra fiel da estratificação ao longo de toda CAQ, este é capaz de registrar com boa representatividade a evolução da espessura da CAQ ao longo do experimento, se comparada ao intervalo do desvio padrão. Após a reestabilização da CAQ, o perfil torna-se uma reprodução bem fiel da mesma.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo para a definição de um projeto de construção de um experimento em escala 1/10 capaz de reproduzir o escoamento da Camada de Água Quente (CAQ) na piscina do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB).

Inicialmente, realizou-se um estudo do sistema da CAQ no topo da piscina do reator de pesquisa RMB por meio do código comercial CFX 14.0, para avaliar a influência do escoamento na piscina na região da CAQ nas primeiras horas após o ligamento do reator. Foi analisada a taxa de dose de radiação teórica no topo da piscina para diferentes potências do aquecedor da piscina e diferentes temperaturas de formação da CAQ. Este estudo demonstrou a eficácia do uso de CFD na determinação de parâmetros de projetos e evidenciou a necessidade de se verificar e validar o cálculo numérico para que os resultados obtidos sejam confiáveis.

Verificou-se a viabilidade de reprodução dos fenômenos na piscina em escala reduzida pela similaridade do número de Froude. A similaridade foi confirmada pela semelhança dos perfis de estratificação, obtidos na simulação numérica da piscina do reator e de sua geometria em escala reduzida em 10 vezes. Esta confirmação forneceu o embasamento teórico para o desenvolvimento de um experimento em escala da piscina do reator.

O tanque projetado para reprodução da piscina do RMB no experimento apresentou estanqueidade em seus primeiros testes e excelente acesso visual a seu interior pelas janelas de acrílico, o que proporcionará acesso óptico para aplicação de medidores de velocidade a laser em experimentos futuros. As bombas, aquecedores e sensores necessários ao experimento foram dimensionados pelos valores das condições de contorno, obtidos na simulação numérica em escala. Assim, para a conclusão da bancada experimental torna-se necessária a instalação destes equipamentos seguidos de sua ligação hidráulica e elétrica, além da criação de um sistema de monitoração e controle ligado junto ao computador para a aquisição de dados.

Os testes com as turbinas demonstraram que estas apresentam um comportamento bem linear da variação de corrente em relação à vazão medida, porém, verificou-se que os

dados fornecidos pelo fabricante não garantem uma medição confiável, o que tornou necessário experimentos para a sua verificação e levantamento de incerteza de medição.

O perfil de temperatura medido pela sonda de termopares na medição da estratificação na proveta demonstrou a eficácia na sonda para a comparação com os cálculos numéricos para a sua validação. Mesmo que o perfil da sonda não tenha sido diretamente comparado com a simulação numérica, observou-se de forma qualitativa a captura de um perfil de temperatura bem similar entre eles.

O teste das malhas na simulação numérica do experimento foi o primeiro passo para a etapa da verificação do cálculo numérico. Esta análise foi feita de forma qualitativa, buscando avaliar boas práticas de geração de malha para a simulação numérica da bancada de testes. Pela comparação entre elas verificou-se que a variação do resultado entre a malha intermediária e a mais refinada é mínima e se diferenciam da malha mais grossa. Assim, recomenda-se para o estudo da estratificação o uso da malha com configurações semelhantes ao da malha intermediária, por possibilitar um resultado similar ao da malha refinada aplicando menor recurso computacional.

A comparação dos perfis de temperatura em diferentes regiões da CAQ na simulação do experimento mostrou que, durante o transiente inicial, a oscilação na CAQ ocasiona uma alteração do perfil de temperatura ao longo de seu volume, porém, a medição de um único perfil central, apesar de se diferenciar do perfil médio, é um bom indicativo do perfil da CAQ. Após a reestabilização da CAQ, a medição de um único perfil torna-se a representação geral de toda a camada.

Com base na simulação numérica preliminar do experimento e nos testes preliminares com os instrumentos empregados nas medições das condições de contorno e perfil da CAQ, espera-se que a validação do cálculo seja possível utilizando-se a bancada experimental. Com a obtenção de dados experimentais, será possível avaliar um maior número de parâmetros aplicados no código comercial de *CDF*, dentre os quais, destacam-se os modelos de turbulência empregados, que constituem simplificações numéricas do escoamento e que podem estar relacionados com incertezas na reprodução dos fenômenos envolvidos na estratificação da CAQ.

A bancada experimental, além de prover dados do comportamento da CAQ, poderá futuramente ser utilizada para outros estudos na piscina do RMB como, por exemplo, na análise do escoamento por convecção natural do reator, já que foi construída de modo a ser uma reprodução o mais fiel possível do reator e é de fácil adaptação.

O cálculo numérico utilizando *CFD* possui a capacidade de reproduzir o escoamento em todo domínio fluido, possibilitando uma análise localizada dos fenômenos. Esta característica faz com que após a validação e verificação dos cálculos numéricos, seja possível utilizar esta ferramenta para avaliar a taxa de dose na piscina do RMB de forma mais precisa. Esta avaliação poderia ser feita incluindo a produção de radioisótopos, a eficiência da coluna troca íons, a dispersão destes elementos pela piscina e a atenuação da radiação exercida pela água, o que poderá auxiliar nos estudos de proteção radiológica do reator.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. ANSTO, endereço eletrônico: < <http://www.ansto.gov.au> >, (2011).
2. ANSYS CFX-14.0, “*User manual*”, ANSYS-CFX, (2013).
3. BAPTISTA, F., “*Desenvolvimento do sistema da camada quente do reator IEA-R1 do IPEN*”, IPEN-CNEN, São Paulo (1995)
4. BRITISH STANDARD 4094. “*Recommendation for data on shielding from ionizing radiation. Part 1. Shielding from gamma radiation*”. British Standards Institution, (1966).
5. CNEN, “*Concepção do elemento combustível do RMB*”, Relatório Técnico: RMB-10300-002-00 (2010a).
6. CNEN, “*Geração de Seções de Choque para o Primeiro Núcleo do Reator Multipropósito Brasileiro*”, Relatório Técnico: RMB-10100-RD-003.00 (2010b).
7. COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, “*Réacteur Osiris Rapport Descriptif*”, Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay– Rapport CEA-R-3984. COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, Avril (1970).
8. CONTECH, “*Certificado de Calibração turbina nº12110666*”, (2013).
9. JUN et al. “*estimation of aluminum and argon activation source in the HANARO coolant*”, Korea Atomic Energy Research Institute, (2010).
10. KIM H., HAN G. Y., “*Flow Characteristics of the HANARO Reactor Pool*”, 9th Meeting of the International Group on Research Reactors, (2003).
11. LAMARSH, J.R., Introduction to Nuclear Engineering, Addison-Wesley Publishing Company, (1988).
12. LEE, S. et al. “*Reduction of the pool-top radiation level in HANARO*”, JAERI –conf, p. 124 – 129, (1999).
13. MALALASEKERA, W et al. “*An introduction to Computational Fluid Dynamics*”. 2ªEd. Pearson. Londres, (2007)
14. MALISKA, C.R., “*Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*”. LTC, Rio de Janeiro, (1955).
15. METCALF, P., “*Distributed Control system: Linear design options and analysis for a reactor hot layer system*”, IEEE International Conference on Control applications, p. 2421-2425, (2010).



16. NAVARRO, M. A. Descrição de sistema – Camada quente e purificação. CNEN. Relatório Técnico: RMB-11200-MS-001 (2010).
17. PSAR, “*Preliminary Safety Analysis Report for ANSTO Replacement Research Reactor Facility*”, (2001).
18. RIBEIRO, “*Análise experimental e computacional da camada de água quente para proteção radiológica em reatores de piscina*”, Dissertação de mestrado. Escola politécnica de São Paulo, (1995).
19. ROACHE P.J., “*Fundamentals of Verification and Validation*”, Hermosa Publishers, 2009
20. SAR, “*Safety Analysis Report for ANSTO Replacement Research Reactor Facility*”, (2004).
21. SCHWEIZER, F. L. A. “*Investigação numérica do escoamento na piscina do Reator Multipropósito Brasileiro*”. Trabalho de Graduação. UFMG. Belo Horizonte (2012).
22. SHOKR, A. M., “*Performance analyses of the pool-top radiation level reduction system at the ETRR-2 research reactor*”. Kerntechnik, vol. 71, p. 130-133, (2006).
23. TECNOFLUID. “*Certificado de calibração da Turbina TVTP*”, número do certificado: 101412, (2012).