

Gabriel Caio Queiroz Tomaz

**Estudo Experimental da Camada de Água  
Quente em um Modelo em Escala do Reator  
Multipropósito Brasileiro (RMB)**

**Belo Horizonte**

**2017**

Gabriel Caio Queiroz Tomaz

**Estudo Experimental da Camada de Água Quente em um  
Modelo em Escala do Reator Multipropósito Brasileiro  
(RMB)**

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

Universidade Federal De Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares

Orientador: Maria Auxiliadora Fortini Veloso

Coorientador: André Augusto Campagnole dos Santos

Belo Horizonte

2017

T655e

Tomaz, Gabriel Caio Queiroz.

Estudo experimental da camada de água quente em um modelo em escala do reator multipropósito brasileiro (RMB) [manuscrito] / Gabriel Caio Queiroz Tomaz. – 2017.

52 f., enc.: il.

Orientadora: Maria Auxiliadora Fortini Veloso.

Coorientador: André Augusto Campagnole dos Santos.

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

Bibliografia: f. 52.

1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Camada de água quente - Estudos experimentais - Teses. 3. Reatores nucleares - Teses. 4. Reator Multipropósito Brasileiro - Teses. I. Veloso, Maria Auxiliadora Fortini. II. Santos, André Augusto Campagnole dos. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.039(043)



## FOLHA DE APROVAÇÃO

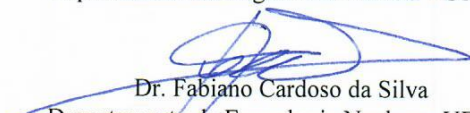
**Estudo Experimental da Camada de Água Quente em um Modelo em Escala do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB)**


**GABRIEL CAIO QUEIROZ TOMAZ**

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 23 de novembro de 2017, pela banca constituída pelos membros:

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

  
Dr. Fabiano Cardoso da Silva  
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

  
Prof. Antonella Lombardi Costa  
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

  
Dr. Hugo Cesar Rezende  
CNEN/CDTN

Belo Horizonte, 23 de novembro de 2017.

# Agradecimentos

Agradeço à CNEN por me conceder a bolsa que viabilizou este trabalho bem como à FAPEMIG por ter disponibilizado recursos para a construção da bancada.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG e ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) pela oportunidade de desenvolver este trabalho, em especial à minha orientadora Maria Auxiliadora Fortini Veloso.

Agradeço ao CDTN, especialmente ao meu co-orientador e amigo André Augusto Campagnole dos Santos por todo o aprendizado que tive em sua companhia, e também ao Vitor Vasconcelos Araújo Silva, ao Antônio Carlos Lopes da Costa e ao José Afonso Barros Filho.

Agradeço aos alunos de iniciação científica Eduardo Salomão e Herick Martins pelo fundamental empenho para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao meu amigo Fernando Schweizer por ter me convidado a participar deste projeto.

Agradeço à Camila pela contribuição com o projeto e mais que tudo pelo companheirismo e carinho.

Acima de tudo agradeço a minha mãe.

# Resumo

O Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) é um reator de pesquisa de 30 MW planejado para ser construído no Brasil. Neste tipo de reator, o núcleo é submerso em uma piscina profunda com água purificada e desmineralizada. A coluna de água acima do núcleo fornece blindagem radiológica para a sala do reator, permitindo também o acesso direto ao núcleo pelos operadores para manutenção e reabastecimento. Entretanto, pequenas concentrações de substâncias dissolvidas permanecem na água da piscina, sendo ativados quando submetidos ao fluxo de nêutrons do núcleo. A água contendo esses elementos ativos se eleva para a superfície por convecção, elevando a taxa de dose a qual os trabalhadores são expostos na sala do reator. Em reatores de piscina aberta mais potentes, como o RMB, a taxa de dose pode ultrapassar os limites ocupacionais, sendo introduzido um circuito termo-hidráulico que cria uma Camada de Água Quente (CAQ) purificada no topo da piscina que limita a chegada de elementos ativos na superfície. O Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) construiu uma bancada experimental em escala 1/10 da piscina do RMB para o estudo do comportamento da CAQ e validação de modelos numéricos. Esse trabalho apresenta os resultados do estudo do impacto na estabilidade da CAQ pelo aquecimento da piscina devido à partida do reator.

**Palavras-chave:** Estudo Experimental, Camada de Água Quente, Reator Multipropósito Brasileiro.

# Abstract

The Brazilian Multipurpose Reactor (RMB) is a 30 MW open pool research reactor planned to be constructed in Brazil. Such type of reactor is built inside a deep pool of purified and demineralized water, providing radiological protection still keeping the core accessible for maintenance and refueling. However, dissolved ions become activated in the pool water due to the core neutron flux, releasing radiation in the reactor room when the activated elements reach the top. Thus high power open pool reactors, as RMB, have an auxiliary thermal-hydraulic circuit that creates a Hot Water Layer (HWL) on the pool's top, keeping the activated water under the HWL and mitigating the dose rate to which the operators are exposed to. The Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) built a 1/10 scale experimental bench of the RMB's pool for the HWL investigation. This work presents the results of the pool's heating due to the reactor startup in the HWL stability.

**Keywords:** Experimental Investigation, Hot Water Layer, Brazilian Multipurpose Reactor.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Piscina do reator OPAL, do tipo de piscina aberta. . . . .	15
Figura 2 – Perspectiva da piscina do RMB e descrição de seus componentes internos. . . . .	16
Figura 3 – Vista de topo do núcleo do RMB dentro do vaso refletor. . . . .	17
Figura 4 – Elemento combustível do OPAL, similar ao do RMB. . . . .	18
Figura 5 – Perspectiva e corte do vaso refletor do RMB. . . . .	18
Figura 6 – Esquema das vazões do circuito primário de refrigeração. . . . .	19
Figura 7 – Diagrama das vazões dos circuitos de refrigeração do OPAL. . . . .	20
Figura 8 – Diagrama do circuito hidráulico da CAQ do reator OPAL. . . . .	21
Figura 9 – Variação da taxa de dose no topo da piscina do reator ETRR-2 com destruição da CAQ na partida. . . . .	22
Figura 10 – Variação da taxa de dose no topo da piscina do reator ETRR-2 com e sem purificação da CAQ. . . . .	23
Figura 11 – Foto da bancada experimental. . . . .	24
Figura 12 – Diagrama hidráulico da bancada experimental. . . . .	25
Figura 13 – Dimensões estimadas para o RMB. . . . .	26
Figura 14 – Dimensões internas do tanque da bancada experimental. . . . .	27
Figura 15 – Dimensões dos elementos internos à piscina da bancada experimental. . . . .	28
Figura 16 – Difusores da CAQ. . . . .	29
Figura 17 – Difusor da piscina. . . . .	30
Figura 18 – Sucção da piscina. . . . .	31
Figura 19 – Esquema de ligação dos medidores de vazão. . . . .	34
Figura 20 – Foto superior da bancada experimental com a sonda de termopares da CAQ ao centro. . . . .	36
Figura 21 – Imagem da tela do software de controle da bancada experimental de- senvolvida em Python 3. . . . .	38
Figura 22 – Diagrama de blocos do sistema de controle PID. . . . .	39
Figura 23 – Diagrama de blocos do sistema de controle de temperatura de injeção da CAQ. . . . .	40
Figura 24 – Gráfico da temperatura de injeção da CAQ em função do tempo no início do teste. . . . .	43
Figura 25 – Perturbação na resposta de $T_{CAQi}$ devido à entrada de água mais fria na sucção. . . . .	44
Figura 26 – Perturbação na resposta de $T_{CAQi}$ devido à entrada de água mais fria na sucção. . . . .	45
Figura 27 – Espessura da CAQ durante a sua formação. . . . .	46
Figura 28 – Perfis de temperatura da CAQ durante sua formação. . . . .	46



Figura 29 – Espessura da CAQ após o acionamento do circuito da piscina. . . . .	47
Figura 30 – Perfis de temperatura da CAQ após o acionamento do circuito da piscina.	48
Figura 31 – Gráfico da espessura obtida experimentalmente para a CAQ formada a 20 °C e o resultado numérico obtido por Schweizer (2014). . . . .	49

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Equipamentos utilizados por circuito da bancada experimental. . . . .	26
Tabela 2 – Parâmetros da injeção do circuito da CAQ durante o período de formação da camada quente no RMB por Schweizer (2014) e as utilizadas na bancada experimental para diferentes deltas de temperatura na formação da CAQ. . . . .	32
Tabela 3 – Condições experimentais após 9000 segundos quando há o acionamento do circuito da piscina. . . . .	32
Tabela 4 – Características dos medidores utilizados . . . . .	33
Tabela 5 – Características das DAQs utilizadas para as condições de teste. . . . .	34
Tabela 6 – Fator de abrangência . . . . .	36
Tabela 7 – Posições dos pontos de medição da sonda de termopares da CAQ . . . . .	36
Tabela 8 – Ganhos dos controladores PID e dos circuitos de atuação . . . . .	40
Tabela 9 – Desempenho do controle de $T_{CAQi}$ . . . . .	42

# Lista de abreviaturas e siglas

AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
ANSTO	<i>Australian Nuclear Science and Technology Organization</i>
CAQ	Camada de Água Quente
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DAQ	<i>Data Acquisition System</i>
LDV	<i>Laser Doppler Velocimetry</i>
NI	<i>National Instruments</i>
NTD	<i>Neutron Transmutation Doping</i>
OPAL	<i>Open Pool Australian Lightwater</i>
PCTN	Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da UFMG
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
PSAR	<i>Preliminary Safety Analysis Report</i>
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>
RMB	Reator Multipropósito Brasileiro
SAR	<i>Safety Analysis Report</i>
SETRE	Serviço de Tecnologia de Reatores

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Objetivos	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>14</b>
2.1	Reatores Nucleares de Pesquisa	14
2.2	RMB	16
2.3	Circuitos de Refrigeração	17
2.4	Sistema da Camada de Água Quente	20
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>24</b>
3.1	Bancada Experimental	24
3.2	Geometria	26
3.3	Análise Dimensional	29
3.4	Condições Experimentais	31
3.5	Sistemas de Medição	32
3.5.1	Perfil de Temperatura da CAQ	36
3.6	Sistema de Controle	37
3.7	Procedimento Experimental	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>42</b>
4.1	Avaliação da Bancada Experimental	42
4.1.1	Temperatura de injeção do circuito da CAQ	42
4.1.2	Temperatura de injeção do circuito da piscina	43
4.1.3	Vazões do circuito da CAQ e da Piscina	45
4.2	Formação da CAQ	45
4.3	Acionamento do Circuito da Piscina e Perturbação da CAQ	47
4.3.1	Comparação com os resultados numéricos	48
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>50</b>
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	51
	Referências	52

# 1 Introdução

O Brasil necessita expandir sua capacidade de produção de radioisótopos, de realizar testes em componentes para centrais nucleares e de conduzir pesquisa e desenvolvimento na área nuclear em geral. O governo brasileiro, por meio da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), firmou uma parceria com a empresa argentina INVAP para a construção do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), que permitirá o país se desenvolver nessas áreas estratégicas.

O RMB será um reator do tipo de piscina aberta com 30 MW de potência baseado no projeto do reator OPAL (*Open Pool Australian Lightwater*), um reator de 20 MW também desenvolvido pela INVAP. Em reatores de piscina aberta, o núcleo do reator é imerso em uma piscina profunda de água desmineralizada e purificada. A coluna de água sobre o núcleo fornece blindagem radiológica para os operadores na sala do reator ao mesmo tempo em que permite fácil acesso ao núcleo (PERROTTA; SOARES, 2015).

Embora exista um sistema de desmineralização e deionização da água da piscina, ainda resta uma pequena concentração de solutos que se tornam ativos devido ao fluxo de nêutrons do núcleo. A água contendo esses elementos ativados ascende à superfície da piscina por convecção, aumentando a taxa de dose na sala do reator, podendo inclusive ultrapassar os limites ocupacionais. Este problema é especialmente relevante em reatores de elevada potência como o RMB.

Nesse tipo de reator é usual a instalação de um circuito auxiliar que injeta constantemente água aquecida e purificada no topo da piscina, formando uma camada de água estratificada que limita a chegada da água proveniente do núcleo à superfície. Este recurso, denominado de sistema da Camada de Água Quente (CAQ), efetivamente fornece uma blindagem entre a água da piscina e a sala do reator.

Foi desenvolvida no Laboratório de Termo-hidráulica do Serviço de Tecnologia de Reatores (SETRE) do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) uma bancada experimental em escala 1/10 da piscina do RMB para o estudo do sistema da CAQ e validação de modelos numéricos para estudos posteriores. A concepção inicial deste projeto foi feita por Schweizer (2014), que realizou um estudo numérico da CAQ no RMB usando como referência o reator OPAL e propôs um estudo experimental em um modelo em escala.

Neste trabalho, desenvolvido em parceria com o Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da UFMG (PCTN), a bancada experimental do SETRE foi concluída. Foram projetados e construídos a instrumentação, controle e componentes restantes do tanque. Foram realizados experimentos de formação da CAQ em diferentes

temperaturas e analisada a sua estabilidade em uma condição representativa da partida do reator.

Os resultados obtidos mostraram a capacidade da bancada experimental em reproduzir o fenômeno e permitiram uma análise da importância da temperatura de formação da CAQ para a sua estabilidade durante transientes de potência no reator. Foi possível também fazer uma comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos obtidos por [Schweizer \(2014\)](#), mostrando semelhança no comportamento do fenômeno entre os dois estudos. Entretanto, verificou-se também a necessidade de se realizarem estudos numéricos que levem em consideração as condições de teste que realmente foram observadas no experimento, de modo a se obter um modelo numérico que melhor reproduzam os resultados experimentais.

## 1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é apresentar os primeiros resultados obtidos com a bancada experimental em escala reduzida do RMB para o estudo da CAQ.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Apresentar o projeto dos sistemas necessários para a realização do experimento, incluindo componentes do tanque, instrumentação e controle.
- Realizar o experimento representando a formação da CAQ e sua perturbação devido à partida do reator no RMB.
- Analisar o comportamento da CAQ no experimento para diferentes temperaturas de formação e comparação com os resultados numéricos obtidos por [Schweizer \(2014\)](#).

## 2 Revisão Bibliográfica

Reatores nucleares são instalações que visam o aproveitamento da fissão nuclear controlada de átomos como o urânio ( $^{235}\text{U}$  e  $^{233}\text{U}$ ) e o plutônio ( $^{239}\text{Pu}$  e  $^{241}\text{Pu}$ ). O processo de fissão libera energia, nêutrons e produtos de fissão. Nos reatores de potência, o objetivo é o aproveitamento da energia térmica para a geração de energia elétrica. Outro tipo de reator são os reatores de pesquisa, em que são aproveitados o fluxo de nêutrons ou os produtos de fissão.

### 2.1 Reatores Nucleares de Pesquisa

Os reatores de pesquisa podem ser utilizados para diversos fins científicos, tecnológicos ou educacionais. A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA, 2014) lista como usos para reatores de pesquisa:

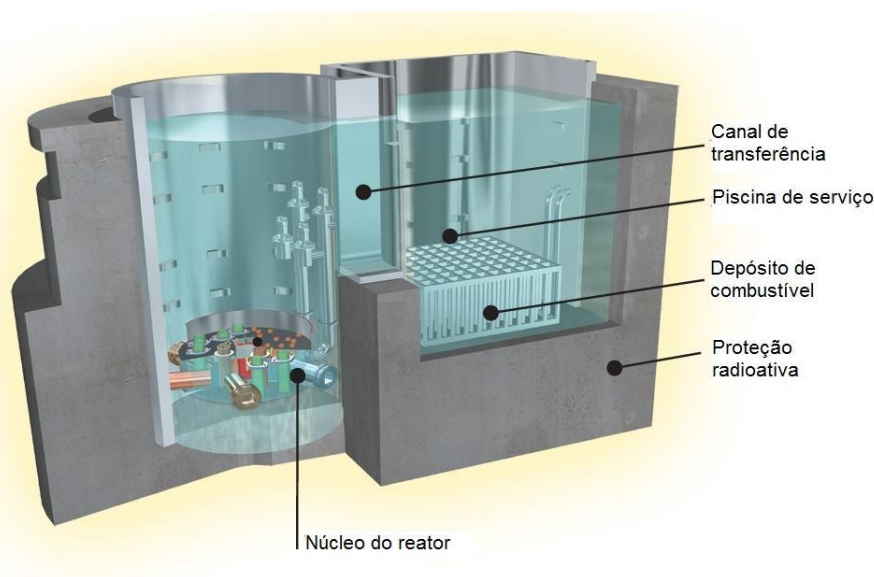
- Educação e treinamento, incluindo a familiarização do público geral com a energia nuclear, no ensino de física e demais ciências naturais, em cursos de técnicas de radioproteção, no ensino de engenharia nuclear e na formação de operadores de reatores;
- Estudo da ativação por absorção de nêutrons, como na análise de elementos combustíveis para reatores, no comportamento de componentes de usinas nucleares sujeitos a fluxos de nêutrons ou em dispositivos para o uso espacial;
- Produção de radioisótopos para os mais diversos usos, incluindo medicina nuclear, indústria, agricultura e pesquisa. Em tempos recentes a oferta no mercado internacional do radioisótopo Mo-99 tem sofrido oscilações, e o reator canadense NRU, responsável por 40 % da produção mundial, será desligado até 2018. O Mo-99 é usado na produção do Tc-99m, hoje empregado em cerca de 80 % de todos os procedimentos na medicina nuclear.
- Geocronologia, na determinação da idade de rochas e minerais;
- Dopagem do silício pela transmutação com nêutrons (NTD, do inglês *Neutron Transmutation Doping*), em que se promove a dopagem precisa de cristais de silício puro para a fabricação de semicondutores.
- Neutronografia, onde imagens internas de objetos são obtidas pela diferença na absorção de nêutrons entre os diversos materiais. Como há maior sensibilidade entre materiais leves em absorver nêutrons do que raios-X, a neutronografia oferece

vantagens em diversos seguimentos como ensaios não destrutivos para aplicações industriais, pesquisas em biologia e análise de artigos arqueológicos.

Em comparação com os reatores de potência, os reatores de pesquisa são instalações muito menores, operam com menor potência, temperaturas e pressões mais baixas e usam menos combustível. Um reator de potência do tipo *Pressurized Water Reactor* (PWR) possui uma potência térmica típica da ordem de 3000 MW, enquanto que a potência de reatores de pesquisa varia entre 0,1 W até centenas de megawatts. Outra característica que os difere é o grau enriquecimento de seus combustíveis, em reatores de pesquisa sendo tipicamente de até 20 % de  $^{235}$ , podendo chegar a até 90 % em alguns casos, enquanto que os reatores de potência normalmente utilizam o combustível enriquecido de 3 a 5 %.

O tipo mais comum de reator de pesquisa é o de piscina aberta, em que o núcleo é construído no fundo de uma grande piscina com sua superfície aberta para a sala do reator. A coluna de água fornece blindagem radiológica e refrigeração para o núcleo. Reatores menores geralmente são resfriados apenas por convecção natural, enquanto que reatores com potência na ordem dos megawatts necessitam de um circuito de refrigeração do núcleo. A piscina aberta também oferece fácil acesso ao reator, permitindo a manipulação direta do combustível, de amostras sendo irradiadas no interior do núcleo e facilitando o reabastecimento. O combustível usado é armazenado em uma piscina de serviço que é conectada à piscina do reator por um canal de transferência. A [Figura 1](#) apresenta um esquema de um reator de pesquisa.

Figura 1 – Piscina do reator OPAL, do tipo de piscina aberta.



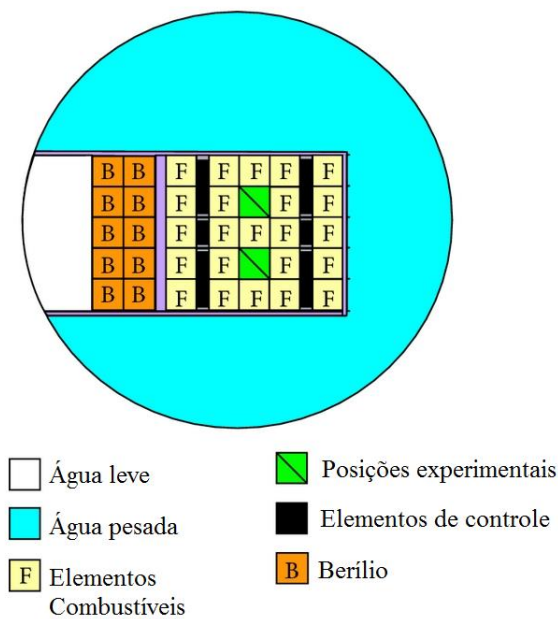
Fonte: ANSTO





combustíveis são compostos por 21 placas de uma dispersão de siliceto de urânio ( $U_3Si_2$ ) enriquecido a 19,75 % e misturada com alumínio, contida em um revestimento de liga de alumínio 6061. O elemento combustível do OPAL, semelhante ao do RMB, pode ser visto na [Figura 4](#). Suas dimensões são 80,5 mm x 80,5 mm x 1045 mm. O núcleo também possui 6 placas de controle de háfnio independentes, que se movem paralelamente às placas do combustível.

Figura 3 – Vista de topo do núcleo do RMB dentro do vaso refletor.



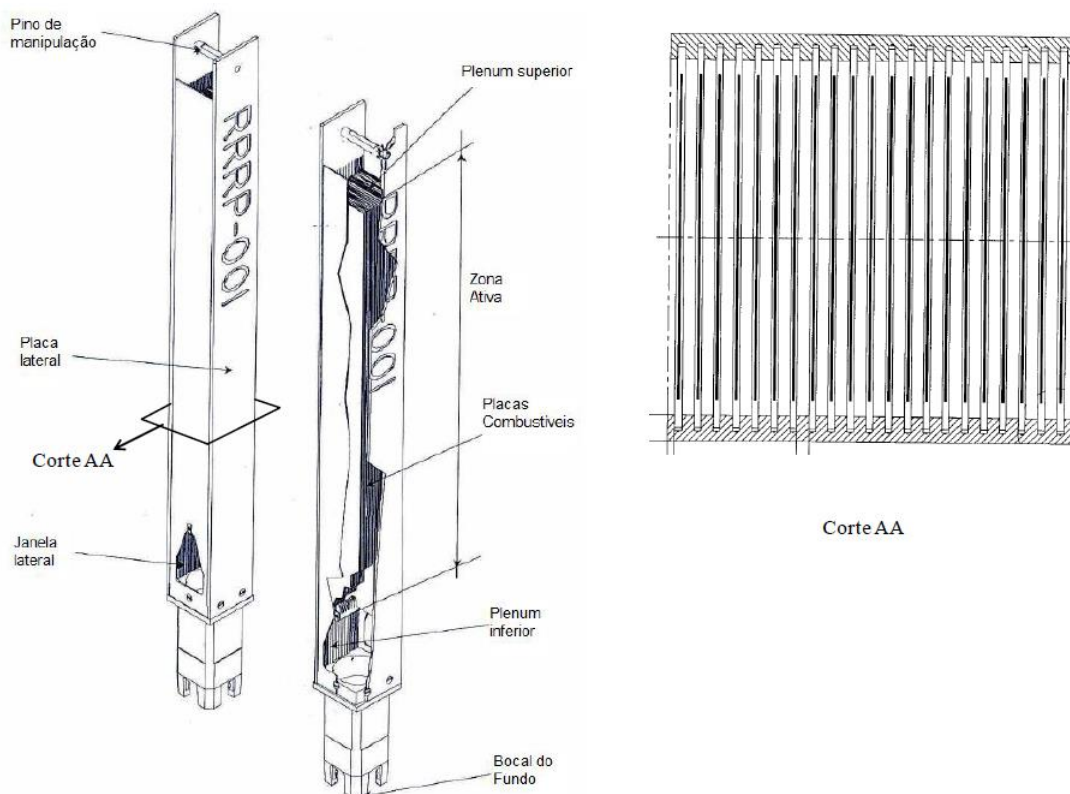
Fonte: Soares et al. (2014)

O núcleo fica inserido dentro de um vaso de zircaloy de 2,6 metros de diâmetro preenchido com água pesada ( $D_2O$ ), que tem a função de refletir os nêutrons de volta para o núcleo. No vaso refletor também se encontram as posições para teste de combustíveis, com placas de berílio atuando como refletor nessa parte no lugar da água pesada, além de ser um multiplicador de nêutrons e moderador. Uma forma de se desligar o reator é drenando parcialmente a água pesada com a injeção de hélio, sendo um mecanismo completamente independente das barras de controle, e portanto, adicionando segurança ao reator. A [Figura 5](#) apresenta uma perspectiva e corte do vaso refletor, permitindo ver as posições de irradiação e de teste de combustível.

## 2.3 Circuitos de Refrigeração

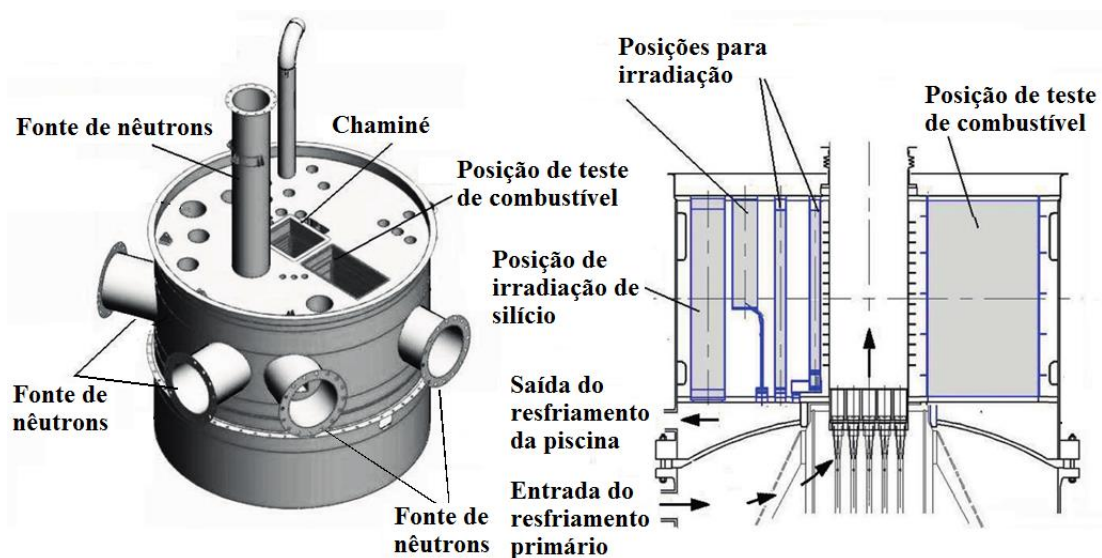
Devido a elevada concentração de potência do núcleo, o seu resfriamento deve ser feito por convecção forçada, sendo realizado pelo circuito primário de refrigeração. Como

Figura 4 – Elemento combustível do OPAL, similar ao do RMB.



Fonte: INVAP (2004)

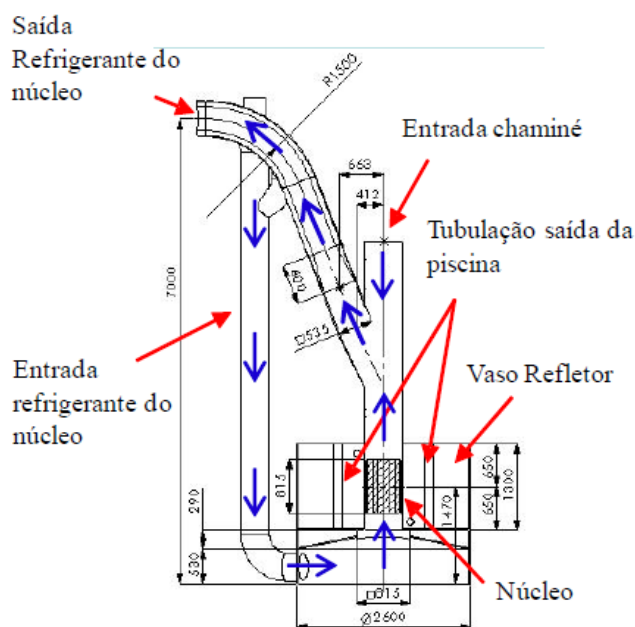
Figura 5 – Perspectiva e corte do vaso refletor do RMB.



Fonte: Perrotta e Soares (2015)

pode ser visto na [Figura 6](#), a água entra no núcleo pelo *Plenum* inferior, passa pelo núcleo e sai por uma tubulação conectada à chaminé, sendo direcionada para um sistema de purificação e trocadores de calor. A chaminé é aberta para a piscina, de modo a permitir o acesso direto aos componentes internos do núcleo. Para evitar a saída de água do circuito primário para a piscina, é feita pressão negativa na saída do circuito, induzindo uma entrada de água pela abertura da chaminé correspondente a 10 % da vazão do circuito primário. A parcela da vazão relativa à água que entra pela chaminé é direcionada para o circuito de interconexão, transferindo a vazão excedente para o circuito de refrigeração da piscina.

Figura 6 – Esquema das vazões do circuito primário de refrigeração.



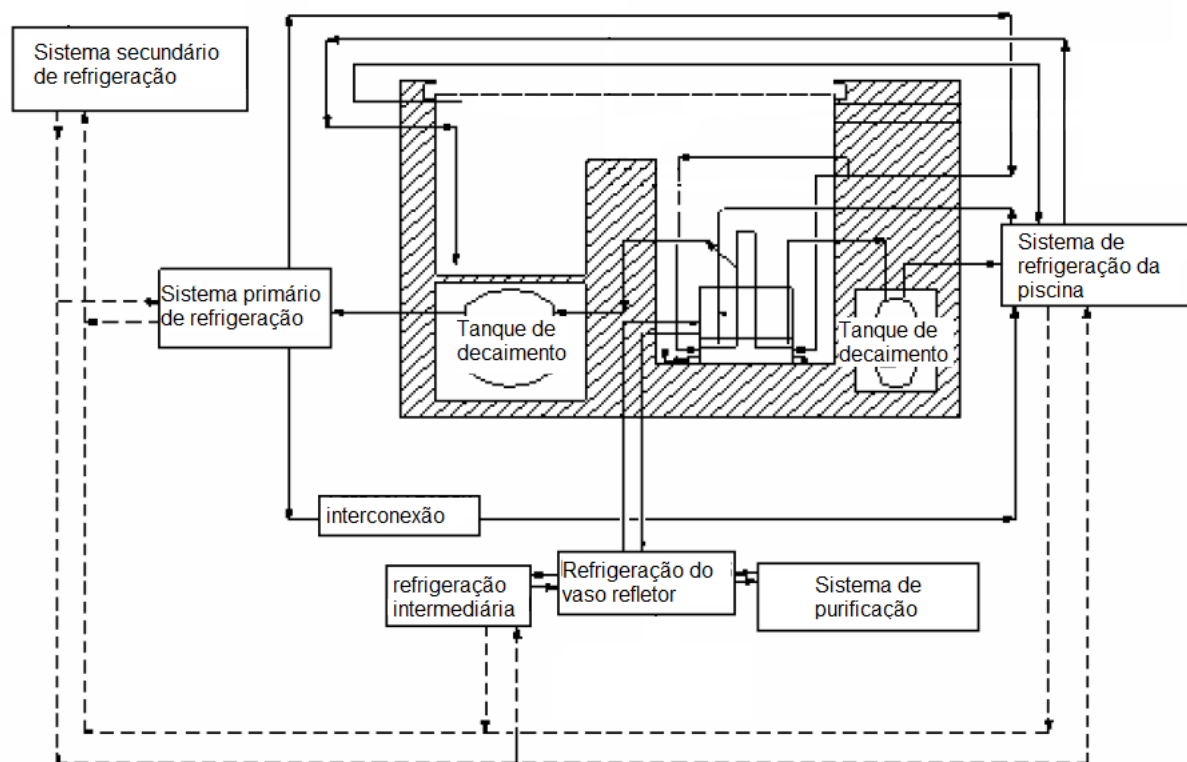
Fonte: Schweizer (2014)

No circuito de refrigeração da piscina, a água entra pelos orifícios das posições de irradiação sobre o vaso refletor, resfriando os objetos irradiados, e flui em seguida para o *Plenum* de saída dos dispositivos de irradiação, que se localiza entre o tanque de  $D_2O$  e o *Plenum* inferior do circuito primário de resfriamento. A água então segue para um tanque de decaimento, por colunas de filtração com resinas de troca iônica e por um trocador de calor.

A saída do circuito de refrigeração da piscina é então dividida em duas linhas. Uma segue ao fluxo do circuito de interconexão, e o fluxo total é injetado no fundo da piscina do reator por um distribuidor toroidal. A outra é dividida entre uma pequena parte que é injetada dentro da piscina do reator em pontos específicos para evitar estagnação de água, e a restante que é injetada dentro da piscina de serviço (SAR, 2004). A [Figura 7](#) apresenta

um esquema das vazões dos circuitos de refrigeração do OPAL, que é semelhante ao do RMB.

Figura 7 – Diagrama das vazões dos circuitos de refrigeração do OPAL.



Fonte: Adaptado de INVAP (2004)

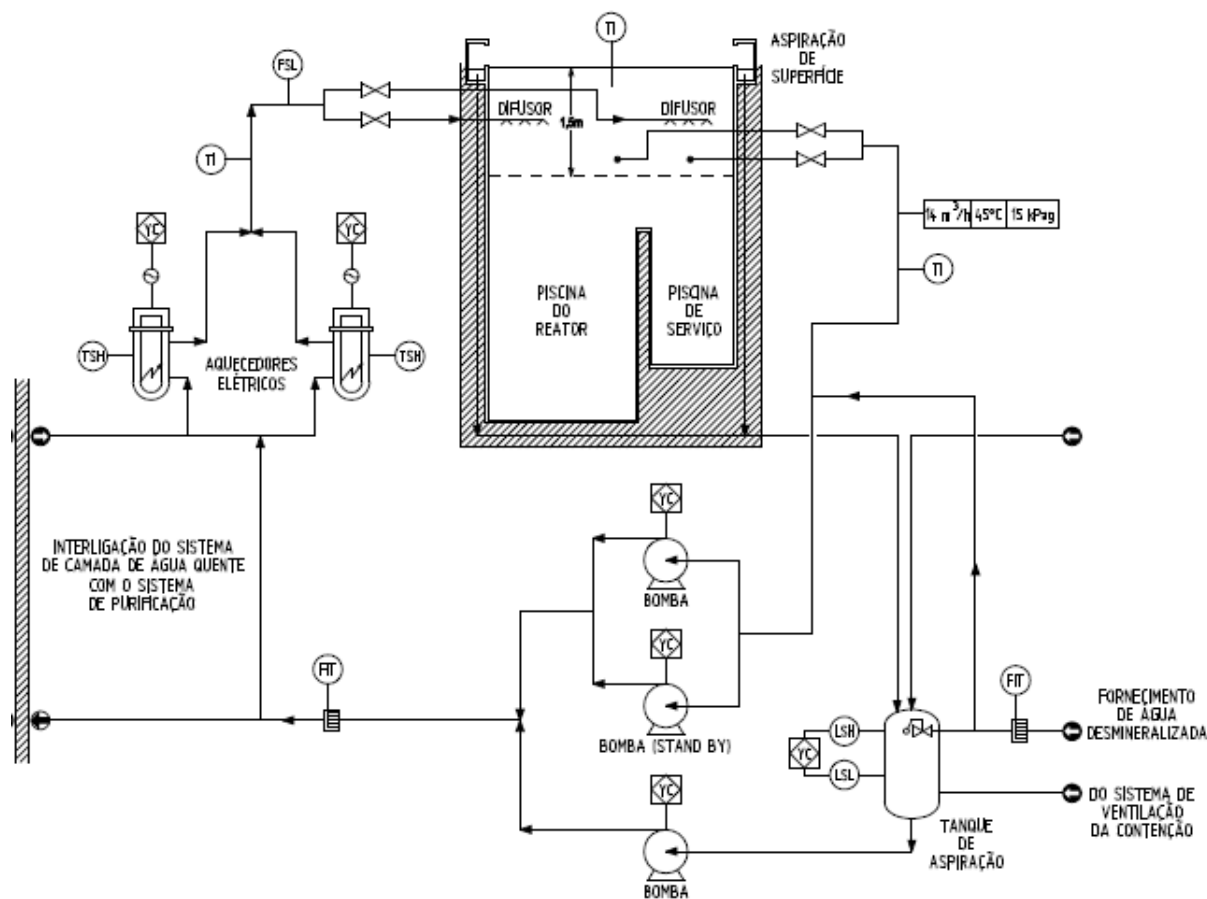
## 2.4 Sistema da Camada de Água Quente

Devido à elevada potência do RMB, a taxa de dose causada pelos elementos ativos na superfície da piscina pode extrapolar os limites ocupacionais na sala do reator. Para mitigar esse problema, é criada uma Camada de Água Quente (CAQ) de 1,5 metros de espessura no topo da piscina por um circuito adicional. A forte estratificação térmica entre a água aquecida no topo da piscina e a água mais fria ao fundo minimiza a mistura entre as duas regiões, limitando a chegada de solutos ativados à superfície. Metcalf (2010) cita que estudos da INVAP apontaram que uma diferença de 5 °C entre a CAQ e a água da piscina é o suficiente para manter a blindagem radiológica. O sistema da CAQ também possibilita a limpeza da superfície da piscina ao permitir o transbordo de água para canaletas laterais, levando junto partículas em suspensão.

O circuito da CAQ succiona a água a 1,5 metros de profundidade e a bombeia para as colunas de purificação com resinas de troca iônica, onde as impurezas presentes

na água são retiradas. A água é então aquecida e reinjetada através de difusores no topo da piscina. A água que flui para os canais de transbordo é aspirada para um tanque e enviada para o sistema de purificação. A Figura 8 apresenta um diagrama do sistema para o reator OPAL, sendo semelhante ao empregado no RMB.

Figura 8 – Diagrama do circuito hidráulico da CAQ do reator OPAL.

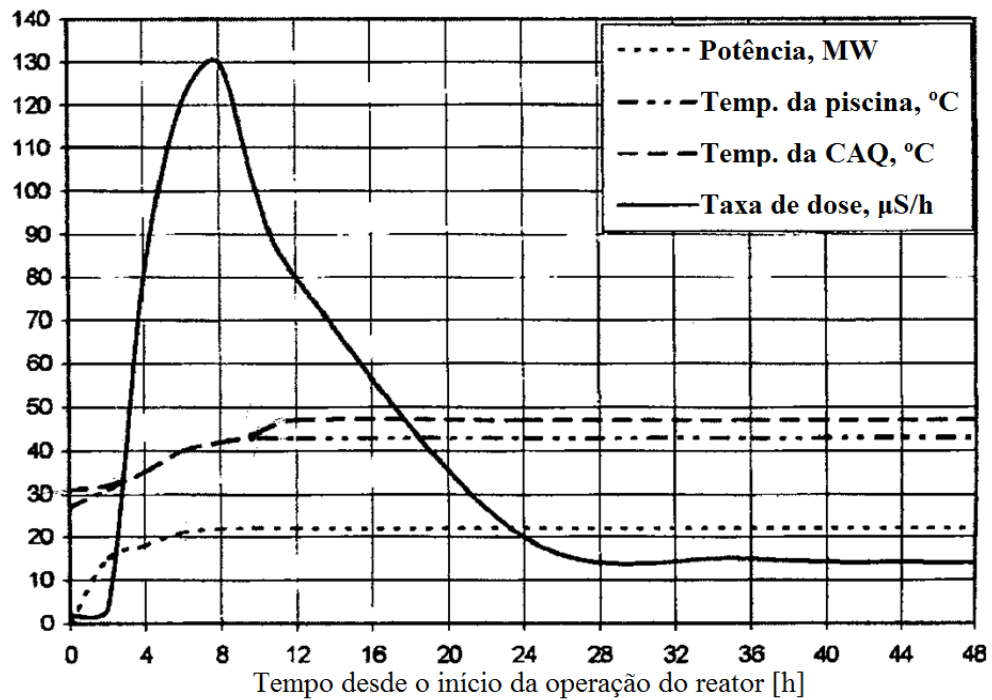


Fonte: INVAP (2004)

A atividade na superfície da piscina se torna maior durante a partida do reator, quando há o aquecimento da piscina e o aumento na concentração de radioisótopos na água. Shokr (2006) estudou a eficácia da CAQ no reator ETRR-2, um reator de piscina aberta de 22 MW. Foi utilizada uma CAQ de 1,5 metros de espessura com uma diferença de temperatura de 5 °C em relação à água da piscina. Na Figura 9 observa-se que, com a partida do reator, houve um aumento na temperatura da piscina, que chega a se igualar à temperatura da CAQ destruindo-a como um todo. Nesse momento, a taxa de dose na sala do reator se eleva abruptamente, reduzindo-se posteriormente à medida que a CAQ se recupera e que sua água é purificada.

A importância da purificação da água no sistema da CAQ também foi demonstrada ao se observar a taxa de dose no reator por um período de 10 horas, como apresentado no

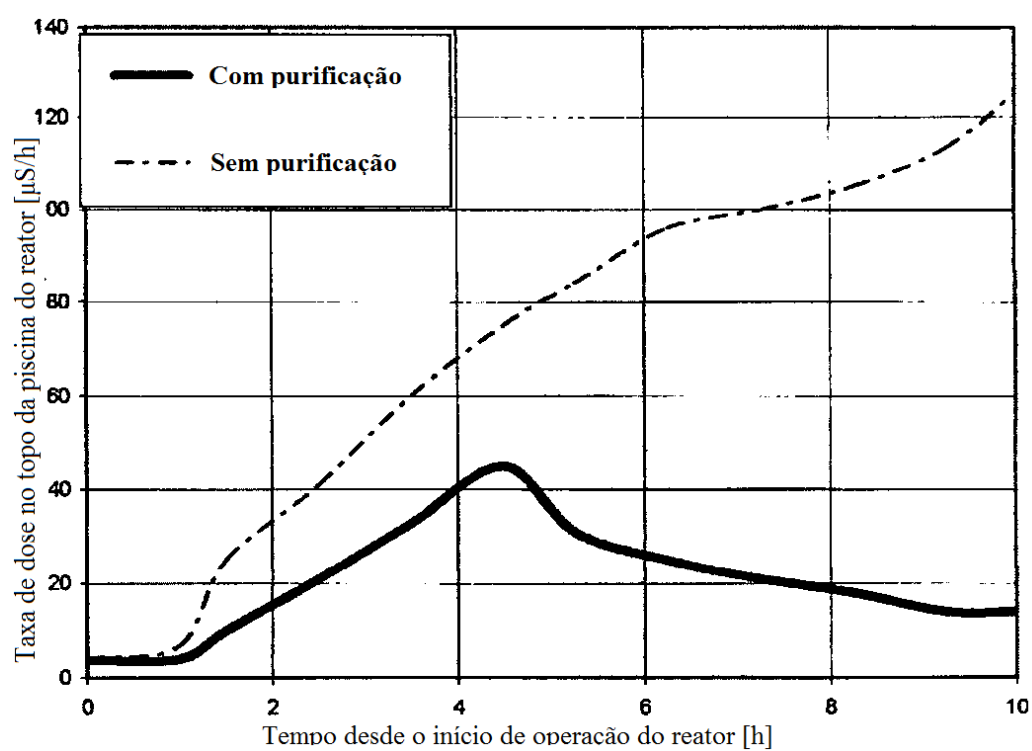
Figura 9 – Variação da taxa de dose no topo da piscina do reator ETRR-2 com destruição da CAQ na partida.



Fonte: Adaptado de [Shokr \(2006\)](#)

gráfico da [Figura 10](#). Com o sistema de purificação ativado observou-se uma taxa de dose máxima de 15  $\mu\text{S/h}$ , enquanto que, com o sistema desligado, a taxa de dose máxima foi de 125  $\mu\text{S/h}$ .

Figura 10 – Variação da taxa de dose no topo da piscina do reator ETRR-2 com e sem purificação da CAQ.



Fonte: Adaptado de [Shokr \(2006\)](#)



## 3 Metodologia

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada no estudo experimental da formação da CAQ e de sua estabilidade durante um transiente de potência em reator de piscina aberta.

Foram realizados experimentos em uma bancada de testes que representa a piscina do reator RMB em uma escala de 1/10, com a formação da camada quente a diferentes temperaturas em relação a água da piscina. Circuitos termo-hidráulicos são responsáveis pela formação da CAQ e pela injeção de água aquecida no fundo da piscina, reproduzindo o funcionamento dos circuitos de refrigeração da piscina e do núcleo do reator.

Para este estudo, apenas a parte do tanque relativa à piscina do reator foi usada, tendo sido instalado um anteparo na entrada do canal de transferência. Com isso o tempo de teste foi bastante reduzido, propiciando a obtenção dos resultados de forma mais rápida.

### 3.1 Bancada Experimental

Os experimentos foram realizados na bancada em escala reduzida mostrada na [Figura 11](#) que foi construída no Laboratório de Termo-hidráulica do CDTN para o estudo do sistema da CAQ no RMB.

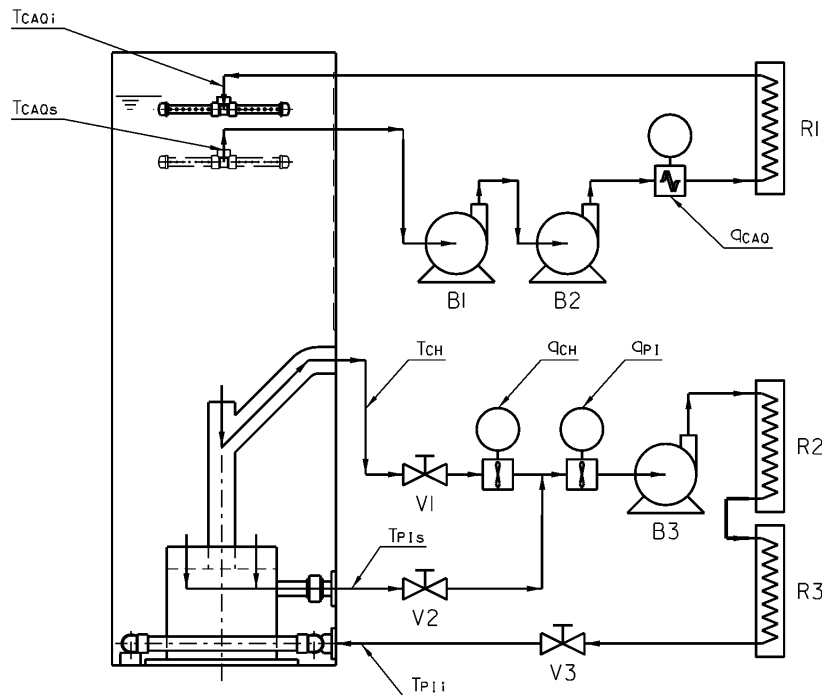
Figura 11 – Foto da bancada experimental.



O diagrama da [Figura 12](#) apresenta os circuitos termo-hidráulicos para reproduzir os escoamentos da piscina.

Figura 12 – Diagrama hidráulico da bancada experimental.

$T_{CAOs}$ - Temperatura de sucção da CAQ	$T_{Pi}$ - Temperatura de injeção da piscina
$T_{CAOi}$ - Temperatura de injeção da CAQ	$q_{CAQ}$ - vazão do circuito da CAQ
$T_{Ch}$ - Temperatura de sucção da chaminé	$q_{Ch}$ - vazão de entrada da chaminé
$T_{Pis}$ - Temperatura de sucção da piscina	$q_{P1}$ - vazão total do circuito da piscina



O circuito da CAQ consiste em um bocal de sucção, duas bombas centrífugas em série, um medidor de vazão por Coriolis, um aquecedor, termopares na entrada e na saída do circuito e um difusor de injeção.

O circuito da piscina recria os escoamentos produzidos pelo circuito de refrigeração da piscina e pela entrada de água na chaminé no circuito primário de refrigeração. Para representar o funcionamento do sistema de interconexão, estes fluxos se somam e são reinjetados ao fundo no difusor da piscina. Este circuito é composto pelas sucções da chaminé e da piscina, válvulas nas duas entradas para ajuste da proporção entre as vazões de cada sucção, dois medidores de vazão do tipo turbina axial, sendo um na perna da chaminé e o outro medindo a vazão total, uma bomba centrífuga, um banco de aquecedores elétricos, uma válvula na saída e termopares nas entradas e na saída do circuito.

A [Tabela 1](#) relaciona os equipamentos usados em cada circuito.

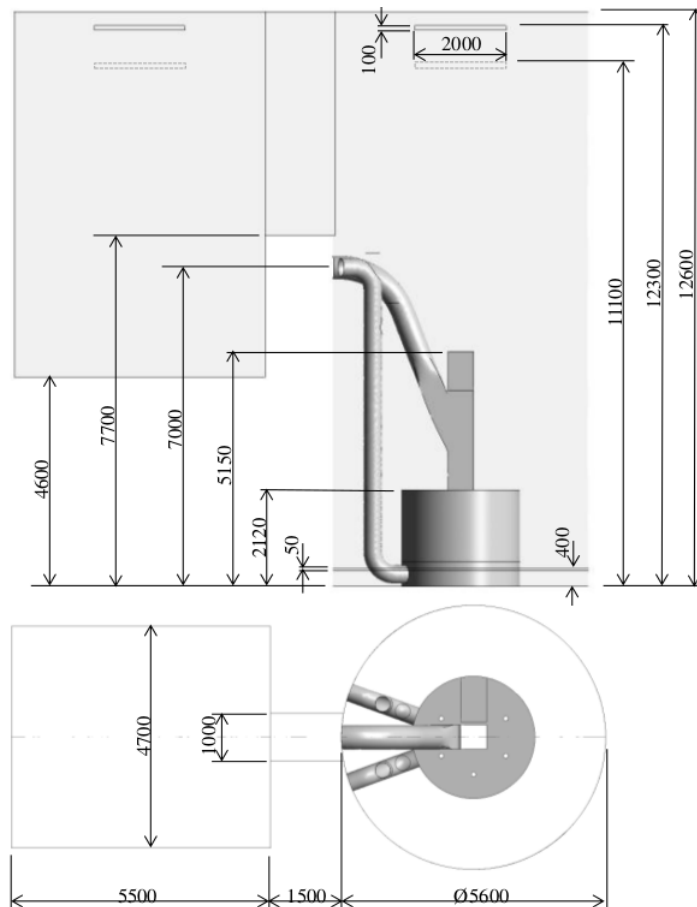
Tabela 1 – Equipamentos utilizados por circuito da bancada experimental.

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

## 3.2 Geometria

O tanque da bancada experimental foi projetado por Schweizer (2014). Até então não estavam disponíveis as dimensões exatas a serem utilizadas no projeto do RMB, portanto os seus valores foram estimados. Foram usados como referência os dados disponíveis nos relatórios de segurança PSAR (INVAP, 2001) e SAR (INVAP, 2004) do reator OPAL, e as dimensões deste reator foram extrapoladas para um reator de 30 MW de potência. A Figura 13 apresenta as dimensões consideradas para a piscina do RMB.

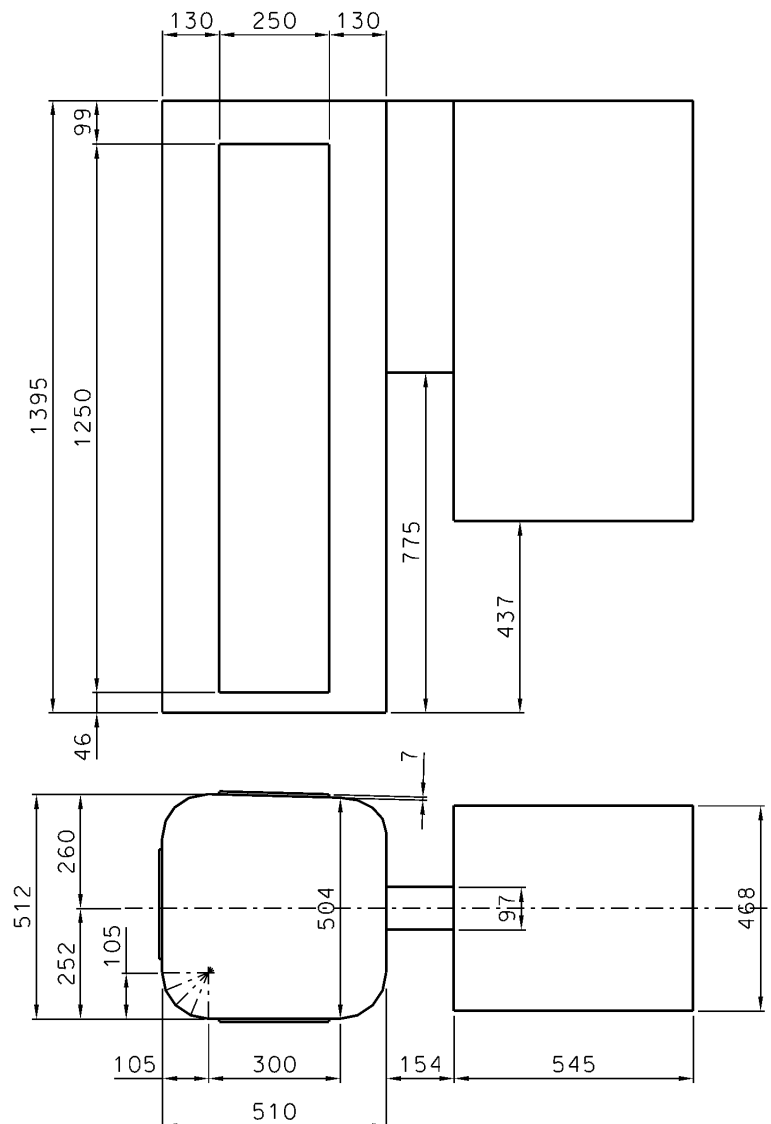
Figura 13 – Dimensões estimadas para o RMB.



Fonte: Schweizer (2014, p. 34)

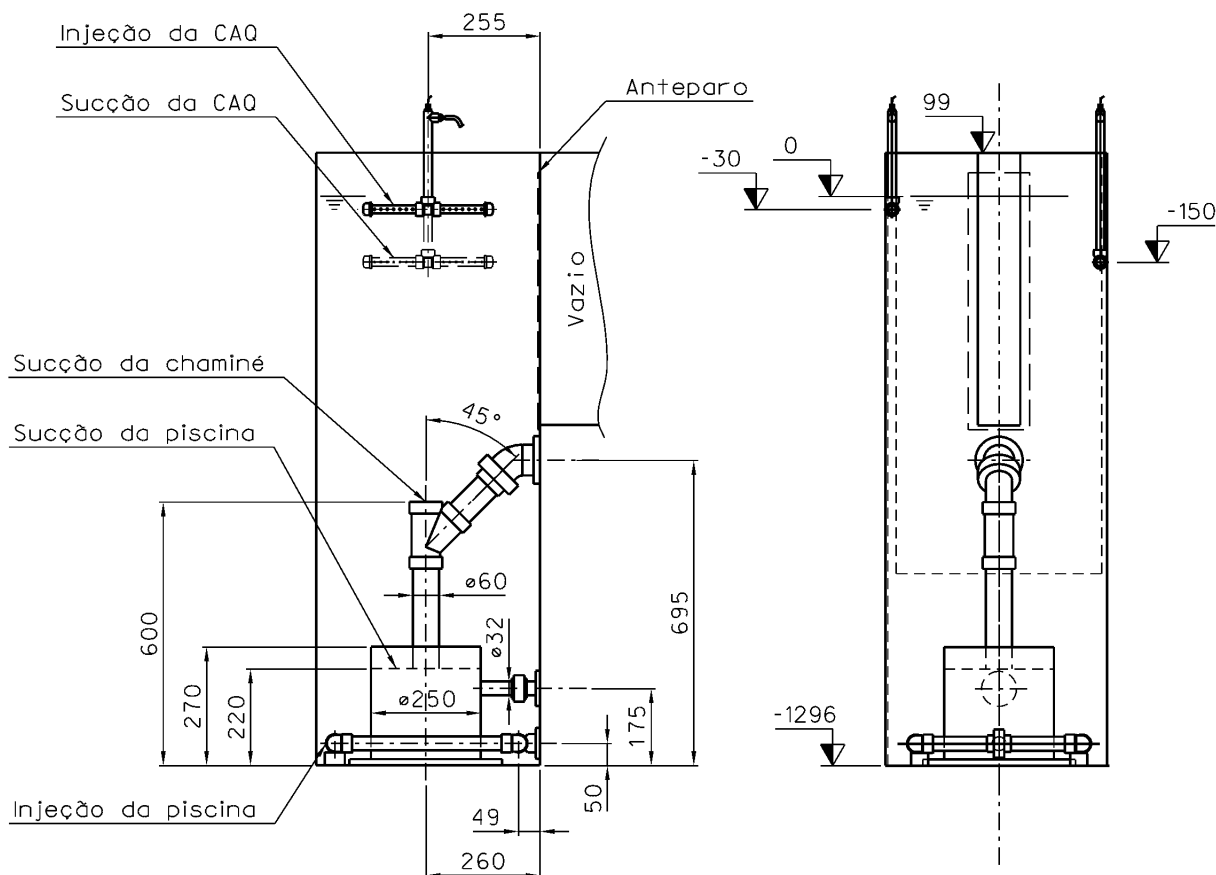
A bancada experimental foi construída em uma escala 1/10 das dimensões estimadas para o RMB, no entanto foram feitas algumas alterações para facilitar sua construção e visualização. As paredes do tanque foram construídas planas, de modo a permitir a instalação de painéis de acrílico em suas laterais. Assim podem ser utilizadas técnicas óticas de medição de velocidade, como o PIV (*Particle Image Velocimetry*) e LDV (*Laser Doppler Velocimetry*). Cada quina no tanque da piscina foi suavizada por cinco dobras na chapa, criando um aspecto próximo de um arco. A Figura 14 mostra as dimensões do tanque na forma em que foi construído, onde também pode-se notar que houve um desalinhamento construtivo em sua parede lateral esquerda devido a um alargamento da parede frontal. Embora esse desalinhamento deva ser inexpressivo para o comportamento termo-hidráulico da bancada, é preciso levá-lo em consideração para o uso de técnicas óticas de medição.

Figura 14 – Dimensões internas do tanque da bancada experimental.



Os elementos internos do tanque, vistos na [Figura 15](#), são o bocal de sucção e o difusor de injeção do circuito da CAQ, a chaminé, o modelo do vaso refletor com a sucção do circuito da piscina e o difusor de injeção da piscina. Também foi instalado um anteparo que impede a passagem de água pelo canal de transferência, contendo toda a água apenas na piscina do reator.

Figura 15 – Dimensões dos elementos internos à piscina da bancada experimental.

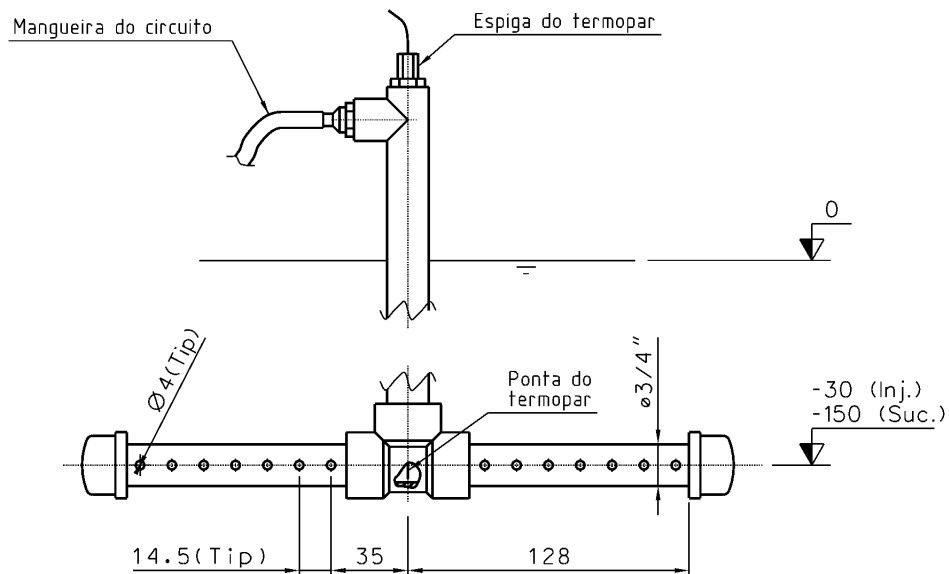


O tanque foi construído em aço inoxidável 304 por sua resistência mecânica e estabilidade química, e os elementos internos foram construídos em PVC. A bancada é montada em uma estrutura sobre rodas para facilitar a sua mobilidade dentro do laboratório.

No circuito da CAQ, o difusor de injeção está posicionado a 30 mm da superfície e a sucção é feita a 150 mm da superfície, fazendo desta a profundidade aproximada da interface da CAQ no regime permanente. Tanto o bocal de sucção como o difusor da injeção possuem as mesmas dimensões, que podem ser visualizadas na [Figura 16](#), diferenciando-se apenas em suas posições. A ponta dos termopares da injeção e da sucção da CAQ estão inseridos nos tês roscáveis na parte inferior dos difusores.

A geometria do difusor da piscina é apresentada na [Figura 17](#). Para que se obtivesse

Figura 16 – Difusores da CAQ.



uma melhor uniformidade nas vazões entre as partes do difusor, foi escolhida uma geometria de tubos concêntricos com furações opostas para a homogenização do escoamento. Na *Parte A* há 5 furos internos e 9 externos, na *Parte B* há 5 furos internos e 8 furos externos e na *Parte C* há 5 furos internos e 17 furos externos. Todos os furos internos têm 2 milímetros e os externos 5 milímetros de diâmetro. Por meio de simulação numérica com o código CFX, observou-se que com o tubo interno a diferença percentual máxima nas vazões entre as partes do difusor foi de 24 %, enquanto que sem este recurso a diferença foi de 74 %.

A vista superior do elemento que representa o tanque refletor, por onde é feita a sucção da piscina, é mostrada na [Figura 18](#).

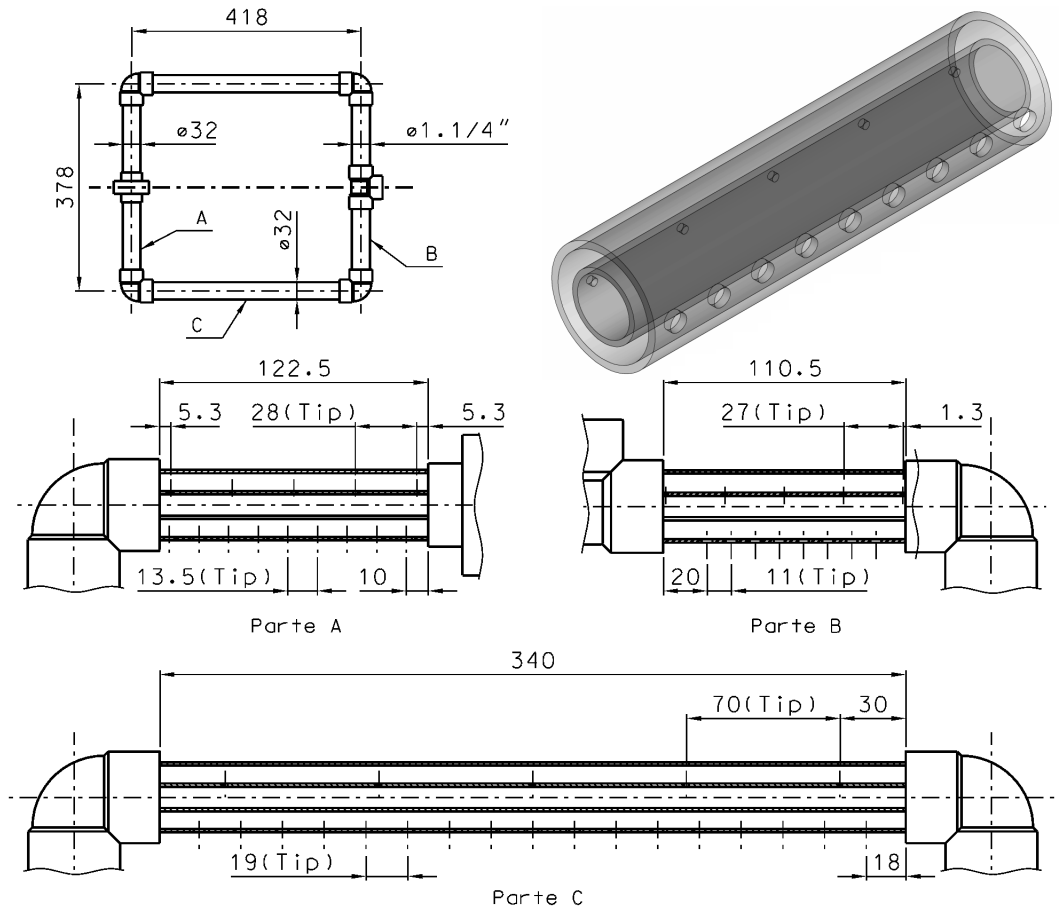
### 3.3 Análise Dimensional

O número de Froude densimétrico ( $Fr_d$ ) foi utilizado para a análise dimensional da bancada de teste por ser o mais representativo para o fenômeno estudado ([SCHWEIZER, 2014](#); [RIBEIRO, 1995](#)). É dado pela [Equação 3.1](#), em que  $v$  é a velocidade do escoamento,  $g$  a aceleração da gravidade,  $l$  o comprimento característico e  $\rho$  a massa específica.

$$Fr_d = \frac{v^2}{g * l * \frac{\delta\rho}{\rho}} \quad (3.1)$$

As temperaturas no modelo em escala e no reator são as mesmas, de modo que

Figura 17 – Difusor da piscina.



mantiveram-se as mesmas massas específicas conforme a [Equação 3.2](#).

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{escala} = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{real} \quad (3.2)$$

O comprimento característico deve ter uma relação de 1/10, como na [Equação 3.3](#).

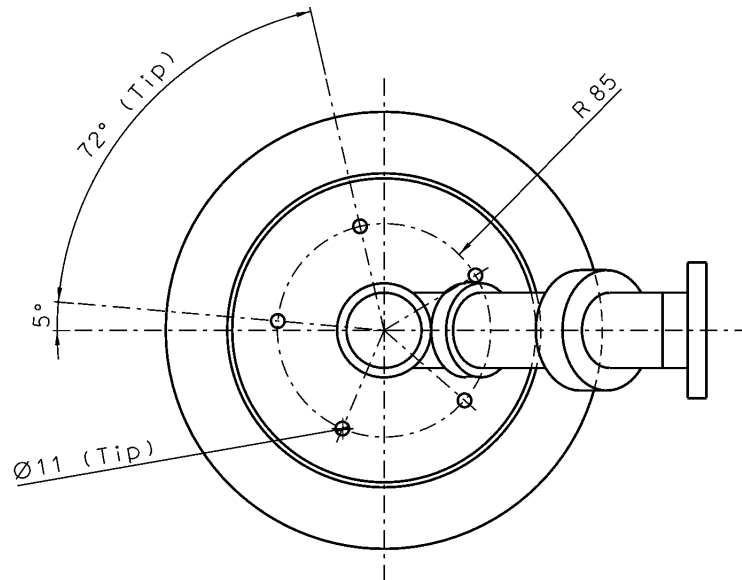
$$l_{escala} = \frac{1}{10} l_{real} \quad (3.3)$$

Assim, para que se satisfaça a similaridade por Froude, a velocidade do escoamento é como mostrada na [Equação 3.4](#).

$$v_{escala} = \frac{v_{real}}{\sqrt{10}} \quad (3.4)$$

Comparando a [Equação 3.3](#) com a [Equação 3.4](#), verifica-se que a vazão mássica

Figura 18 – Sucção da piscina.



( $\dot{m}$ ) na bancada é dada pela [Equação 3.5](#).

$$\dot{m}_{escala} = \frac{\dot{m}_{real}}{100 * \sqrt{10}} \quad (3.5)$$

Dada a relação entre o comprimento característico e a velocidade de escoamento, a correspondência de tempo no experimento é dada pela [Equação 3.6](#).

$$t_{escala} = \frac{\sqrt{10} * t_{real}}{10} \quad (3.6)$$

### 3.4 Condições Experimentais

As vazões e temperaturas na condição analisada do RMB também foram estimadas por [Schweizer \(2014\)](#) por meio de extrapolação, sendo utilizados dados disponíveis nos relatórios de segurança dos reatores OPAL e Osiris, este último de 70 MW. A partir de então, os valores dos parâmetros de teste da bancada experimental foram calculados com base na similaridade pelo número de Froude. No entanto houveram algumas mudanças para atender demandas operacionais, sendo a maior diferença nas temperaturas de injeção da CAQ. Inicialmente esse valor era a própria temperatura de formação da CAQ, assumindo-se a superfície livre como adiabática. A temperatura de injeção adotada no experimento consiste da temperatura desejada para a CAQ mais um valor para compensar as perdas pela superfície.



Na primeira parte do experimento é formada a CAQ a uma determinada temperatura fixa em relação à temperatura inicial da piscina. Para tal, o circuito da CAQ é mantido em funcionamento injetando água a vazão constante de 0,6 litros por minuto e a temperatura constante por 9000 segundos, quando então não há mais variação considerável no perfil de temperatura da CAQ. Neste trabalho foram consideradas três deltas de temperaturas entre CAQ e a piscina: 20 °C, 15 °C e 10 °C. A [Tabela 2](#) mostra as estimativas para os parâmetros de injeção do circuito da CAQ durante a formação da camada quente no RMB, os respectivos valores obtidos para o modelo em escala por análise dimensional e os parâmetros experimentais adotados. Os valores de temperatura são em relação à temperatura inicial da piscina.

Tabela 2 – Parâmetros da injeção do circuito da CAQ durante o período de formação da camada quente no RMB por [Schweizer \(2014\)](#) e as utilizadas na bancada experimental para diferentes deltas de temperatura na formação da CAQ.

$\Delta T$ da CAQ: [°C]	Estimativa RMB		Similaridade por Froude		Condições Experimentais	
	$\Delta T$ [°C]	Vazão [kg/s]	$\Delta T$ [°C]	Vazão [kg/s]	$\Delta T$ [°C]	Vazão [kg/s]
20 °C	20	3.88	20	0.0122	26	0.00977
15 °C	15	3.88	15	0.0122	20	0.00977
10 °C	10	3.88	10	0.0122	14	0.00977

Após a estabilização da CAQ é então acionado o circuito da piscina. Para se reproduzir os efeitos da partida do reator no circuito de refrigeração da piscina pelo sistema de interconexão, a água que é injetada pelo difusor da piscina deve ser aquecida gradativamente por 1139 segundos até atingir a sua temperatura máxima de 8 °C, que é mantida até o fim do experimento. A vazão do circuito da piscina, após o seu acionamento, é mantida constante, e não há alteração nos parâmetros do circuito da CAQ. A [Tabela 3](#) apresenta as condições de teste após o acionamento do circuito da piscina. Os valores de temperatura são em relação à temperatura inicial da piscina.

Tabela 3 – Condições experimentais após 9000 segundos quando há o acionamento do circuito da piscina.

Parâmetro	Estimativa RMB		Similaridade por Froude		Condições Experimentais	
	$\Delta T$ [°C]	Vazão [kg/s]	$\Delta T$ [°C]	Vazão [kg/s]	$\Delta T$ [°C]	Vazão [kg/s]
Injeção Piscina	0 - 8	149.55	0 - 8	0.473	0 - 8	0.498
Sucção Piscina	-	66.47	-	0.210	-	0.216
Sucção Chaminé	-	83.08	-	0.263	-	0.282

### 3.5 Sistemas de Medição

A instrumentação da bancada consiste em sensores, condicionadores de sinal, circuitos de aquisição de dados (DAQs) e a unidade de processamento. A seguir estão listados os parâmetros medidos e o tipo de sensor empregado.

- Temperaturas na sonda da CAQ:  $T_{01}$  a  $T_{15}$  - Medidas por termopar.
- Temperatura de injeção da CAQ:  $T_{CAQi}$  - Medida por termopar.
- Temperatura de sucção da CAQ:  $T_{CAQs}$  - Medida por termopar.
- Temperatura de injeção da piscina:  $T_{PIi}$  - Medida por termopar.
- Temperatura de sucção da piscina:  $T_{PIs}$  - Medida por termopar.
- Temperatura de sucção da chaminé:  $T_{CH}$  - Medida por termopar.
- Vazão mássica do circuito da CAQ:  $q_{CAQ}$  - Medida por medidor de vazão Coriolis.
- Vazão mássica total do circuito da piscina:  $q_{PI}$  - Medida por turbina axial.
- Vazão mássica na entrada da chaminé:  $q_{CH}$  - Medida por turbina axial.

Na [Tabela 4](#) estão os detalhes de cada instrumento de medição utilizado.

Tabela 4 – Características dos medidores utilizados

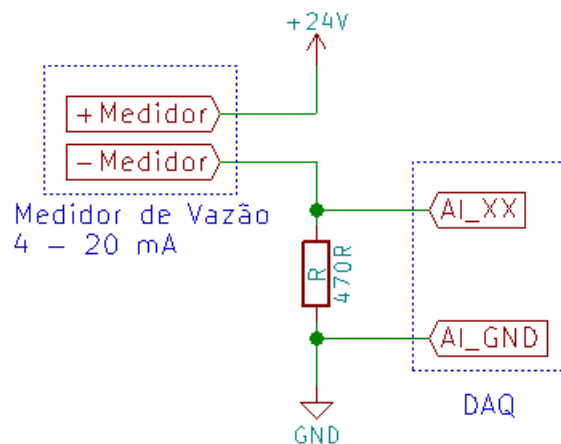
Sensor	Parâmetro	Faixa calibrada	Incerteza de calibração
Termopares tipo T	$T_{01}$	15 a 60 °C	0.33 °C
	$T_{02}$	15 a 60 °C	0.33 °C
	$T_{03}$	15 a 60 °C	0.33 °C
	$T_{04}$	15 a 60 °C	0.33 °C
	$T_{05}$	15 a 60 °C	0.33 °C
	$T_{06}$	15 a 60 °C	0.33 °C
	$T_{07}$	15 a 60 °C	0.33 °C
	$T_{08}$	15 a 60 °C	0.33 °C
	$T_{09}$	15 a 60 °C	0.33 °C
	$T_{10}$	15 a 60 °C	0.33 °C
	$T_{11}$	15 a 60 °C	0.34 °C
	$T_{12}$	15 a 60 °C	0.34 °C
	$T_{13}$	15 a 60 °C	0.34 °C
	$T_{14}$	15 a 60 °C	0.35 °C
	$T_{15}$	15 a 60 °C	0.33 °C
Termopares tipo K	$T_{CAQi}$	15 a 45 °C	0.35 °C
	$T_{CAQs}$	15 a 45 °C	0.34 °C
	$T_{PIi}$	15 a 45 °C	0.34 °C
	$T_{PIs}$	15 a 45 °C	0.34 °C
	$T_{CH}$	15 a 45 °C	0.34 °C
Turbina Contech Ø1" tipo axial	$q_{PI}$	0 a 1.66 kg/s	1.0 %
	$q_{CH}$	0 a 1.66 kg/s	1.0 %
Medidor Coriolis Rheonik RHM 03	$q_{CAQ}$	0.0006 a 0.0833 kg/s	0.1 %

Todos os termopares foram calibrados no CDTN, utilizando um forno de calibração com um sensor do tipo Pt-100. As incertezas dadas pelos certificados de calibração do sensor e de seu multímetro são 0,13 e 0,1 °C respectivamente. A resolução do multímetro

é de 0,01 °C. Todos os termopares foram calibrados já conectados em suas respectivas DAQs, do modelo 9213 da NI (*National Instruments*), que já possuem as juntas frias internamente. Dessa forma, as incertezas da aquisição de dados já estão embutidas nas medições dos termopares. O fator de abrangência no cálculo da incerteza expandida das calibrações foi de  $k=2$ . Os valores das incertezas apresentadas na [Tabela 4](#) referem-se às maiores incertezas encontradas dentro da faixa calibrada de cada termopar.

A incerteza de calibração dos medidores de vazão foram dadas pelo fabricante, e tanto as turbinas do circuito da piscina como o medidor Coriolis do circuito da CAQ, têm suas saídas do tipo 4-20 mA. O modelo da DAQ utilizado para as leituras de vazão foi o NI 6211 da NI. Para que a DAQ possa fazer a leitura das turbinas, é necessário converter o sinal de corrente em tensão por meio de um resistor *shunt*, conforme o esquema da [Figura 19](#). Assim, a incerteza do medidor está associada à incerteza de seu respectivo resistor *shunt*, considerada como sendo 1% de seu valor nominal, que é de 470 ohms. A incerteza de medição da tensão da DAQ 6211 segundo o fabricante é de 2,69 mV.

Figura 19 – Esquema de ligação dos medidores de vazão.



Na [Tabela 5](#) estão listadas as DAQs utilizadas, os parâmetros de medição de cada uma e suas características de leitura.

Tabela 5 – Características das DAQs utilizadas para as condições de teste.

DAQ	Parâmetros	Faixa de medição	Ganho	Incerteza
NI 6211	$q_{CAQ}$ , $q_{PI}$ e $q_{CH}$	0 a 10 V	1	2,69 mV
NI 9213	$T_{CAQi}$ , $T_{CAQs}$ , $T_{PIi}$ , $T_{PIs}$ e $T_{CH}$	0 a 1.89 V	1	0.04 %
NI 9213	$T_{01}$ a $T_{15}$	0 a 1.89 V	1	0.04 %

As medições realizadas pelas DAQs são recebidas pelo sistema de controle em um computador de mesa. Este sistema, implementado em Python 3, também é responsável pelo controle da bancada, como descrito na [seção 3.6](#). As medições são apresentadas em

tempo real no monitor do computador e também são armazenados em um arquivo para acesso posterior.

Neste estudo foram realizados um número  $N = 6$  de testes para cada condição de formação da CAQ, sendo considerado como resultado para cada parâmetro de medição  $i$  a média dos resultados  $\bar{Y}_i$  dos seis testes. A média do parâmetro, o desvio padrão do parâmetro e o desvio padrão da média são dados pela [Equação 3.7](#), a [Equação 3.8](#) e a [Equação 3.9](#) respectivamente.

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{N} \sum Y_i \quad (3.7)$$

$$S_{Y_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Y_i^j - \bar{Y}_i)^2}{N - 1}} \quad (3.8)$$

$$S_{\bar{Y}_i} = \frac{S_{Y_i}}{\sqrt{N}} \quad (3.9)$$

Como cada teste foi realizado em um dia diferente, as condições iniciais quanto às temperaturas ambiente e inicial da água da piscina variaram de teste para teste. Para que fosse permitido o cálculo de uma média, todas as medidas de temperatura obtidas foram consideradas em relação à temperatura inicial da água da piscina no dia.

As incertezas experimentais foram calculadas de acordo com o Guia para a Expressão de Incerteza de Medição ([INMETRO, 2012](#)). A incerteza combinada de cada parâmetro é dada pela [Equação 3.10](#), onde  $u_{cal}$  é a incerteza de calibração e  $u_y$  a dispersão dos dados, equivalente a  $S_{\bar{Y}_i}$ .

$$u_c = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{\bar{Y}_i}^2} \quad (3.10)$$

As incertezas expandidas foram calculadas por meio da [Equação 3.11](#). O fator de abrangência  $k$  foi obtido da [Tabela 6](#), sendo o número de graus de liberdade efetivo ( $v_{eff}$ ) dado pela [Equação 3.12](#).

$$U_c = k u_c \quad (3.11)$$

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n u_i^4 / v_i} \quad (3.12)$$

Onde  $u_i$  é a incerteza associada a  $i$ -ésima fonte e  $v_i$  é o número de graus de liberdade associados a  $i$ -ésima fonte de incerteza.

Tabela 6 – Fator de abrangência

$v_{eff}$	1	2	4	8	16	32	64	128	256
$k$	13.97	4.53	2.87	2.37	2.17	2.08	2.03	2.01	2.00

### 3.5.1 Perfil de Temperatura da CAQ

O perfil de temperatura da CAQ é obtido por meio de uma sonda composta por quinze termopares. Essa sonda é construída de maneira a garantir que os termopares estejam razoavelmente próximos em torno de um eixo vertical e que cada medição seja realizada a uma determinada profundidade, como mostrado na [Tabela 7](#). Os termopares foram dispostos propiciando uma maior densidade de pontos de medição na região onde se tem o maior gradiente térmico. Para esse estudo a sonda foi posicionada no centro da piscina, mas sua estrutura permite o seu posicionamento em qualquer ponto da superfície do tanque. Pela [Figura 20](#) é possível visualizar o seu aspecto e a sua posição em relação ao tanque.

Figura 20 – Foto superior da bancada experimental com a sonda de termopares da CAQ ao centro.

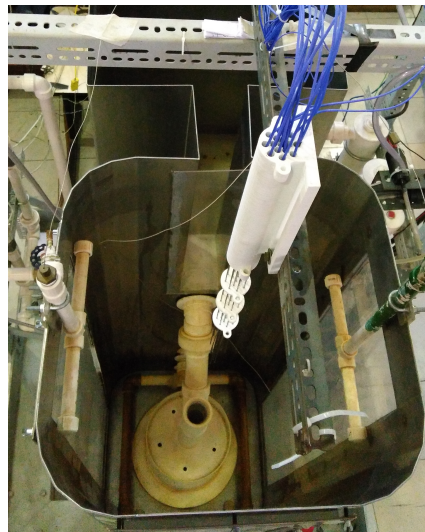


Tabela 7 – Posições dos pontos de medição da sonda de termopares da CAQ

Termopar	T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08
Profundidade [mm]	20	42	60	81	101	112	124	131
Termopar	T09	T10	T11	T12	T13	T14	T15	
Profundidade [mm]	142	151	163	169	182	200	222	

A espessura da CAQ nesse estudo é definida como a distância entre a superfície e o ponto de máximo gradiente no perfil de temperatura, tendo este sido calculado pelo método

das diferenças centradas. Durante o período de perturbação da CAQ, há a formação de vários vórtices na sua interface com a água mais fria da piscina, criando uma grande flutuação de temperatura nos pontos de medição adjacentes. Com isso, houve a necessidade de se utilizar um método de cálculo do gradiente térmico que levasse em consideração pontos que abrangessem uma distância maior, obtendo uma medida de gradiente térmico mais amortecida.

O gradiente térmico é calculado segundo a [Equação 3.13](#), sendo  $N$  um dado termopar da sonda da CAQ,  $T_N$  sua temperatura e  $x_N$  sua respectiva posição em relação à superfície. A posição  $X$  associada ao valor do gradiente é definida como o ponto médio entre  $x_{N-1}$  e  $x_{N+1}$ .

$$\frac{\Delta T_N}{\Delta x_N} = \frac{T_{N+1} - T_{N-1}}{x_{N+1} - x_{N-1}} \quad (3.13)$$

### 3.6 Sistema de Controle

A bancada experimental possui um sistema de controle, desenvolvido como parte deste projeto, implementado na linguagem de programação Python 3. Nele são incorporados: o sistema de medição descrito na [seção 3.5](#), os circuitos de atuação dos equipamentos da bancada, um módulo de controle e uma interface gráfica para o usuário. Na [Figura 21](#) está uma imagem da tela da interface gráfica do sistema de controle da CAQ, em que é possível ver os gráficos com as medições de vazão e temperatura dos circuitos, o perfil de temperatura da CAQ e os campos para a inserção das entradas no controlador. Para testes repetidos, pode ser definida uma rotina de experimento a ser seguida pelo software de controle. Com o uso desse sistema, a operação da bancada durante o experimento é totalmente automatizada, exigindo atuação do operador apenas para iniciar e finalizar o teste.

O sistema possui implementado controladores do tipo PID (Proporcional, Integral e Derivativo) clássico de malha fechada conforme o diagrama de blocos da [Figura 22](#). As funções de transferência dos processos não foram obtidas e os ganhos dos controladores foram estabelecidos por ajuste manual. As respostas do controlador PID são enviadas para o circuito de atuação, composto por uma placa microcontrolada do tipo Arduino Mega 2560 R3 e pelos circuitos de potência para o acionamento dos equipamentos.

Figura 21 – Imagem da tela do software de controle da bancada experimental desenvolvida em Python 3.

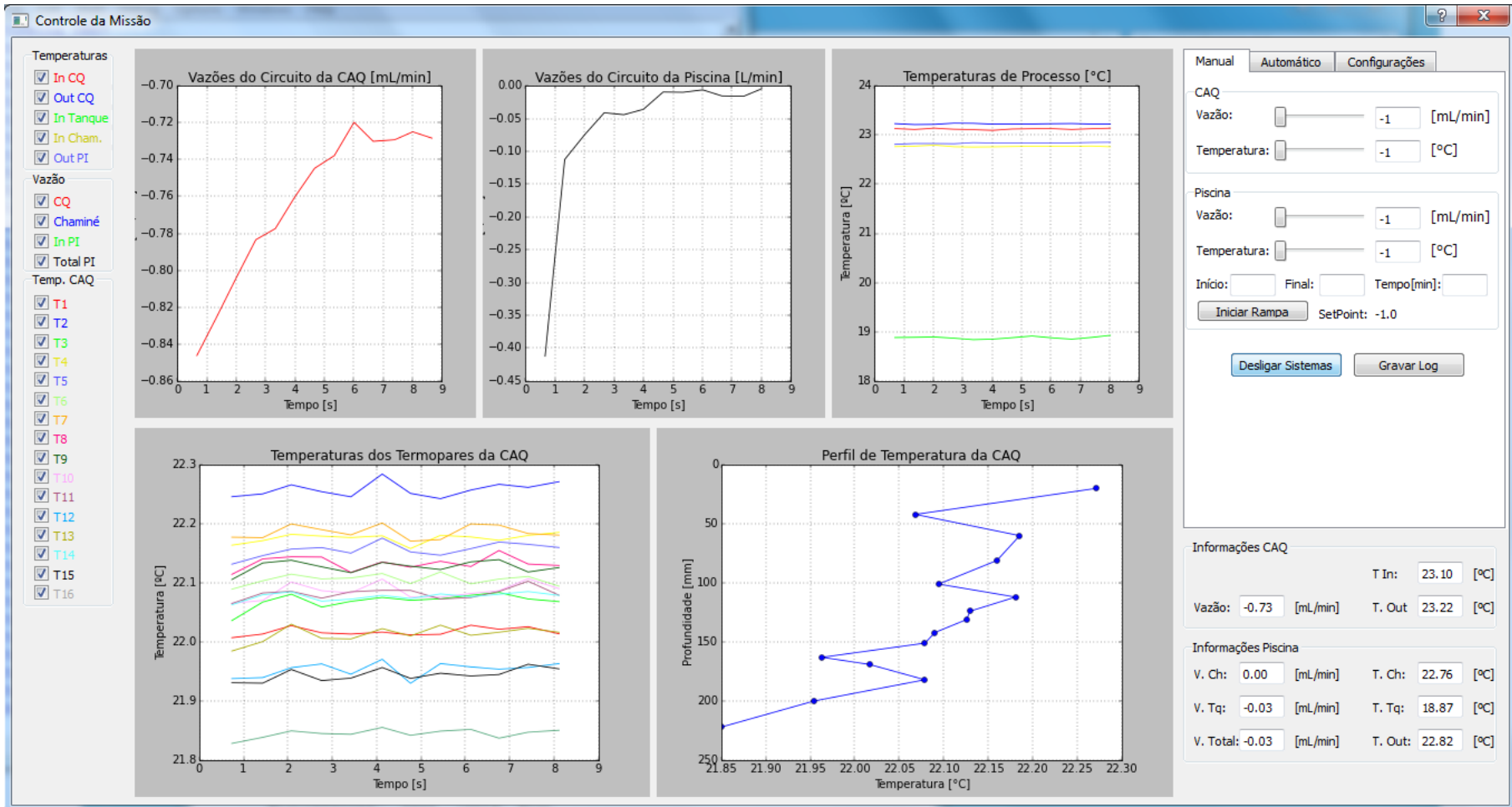
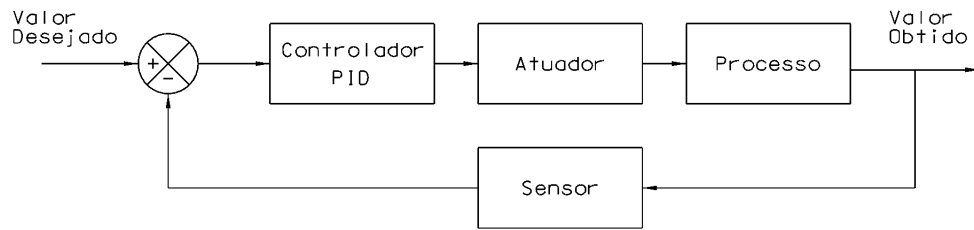


Figura 22 – Diagrama de blocos do sistema de controle PID.



O circuito de atuação recebe do software do controlador valores de potência em uma escala correspondente à escala da saída dos pinos digitais da placa microcontrolada. Após passar pelo circuito de potência, o sinal digital é convertido em um sinal analógico de potência que alimenta o equipamento controlado. Por exemplo, no controle da vazão da CAQ, o controlador envia para o circuito de atuação um valor entre 0 e 255, que por sua vez resulta em uma saída entre 0 e 12 V enviada às bombas. Isso implica que o circuito de atuação adiciona um ganho à malha direta, no caso do exemplo anterior, de  $(12 - 0)/(255 - 0) = 0.0471$ . A [Tabela 8](#) apresenta os valores dos ganhos do controlador PID e os relativos aos circuitos de atuação.

O controle de temperatura de injeção da CAQ possui um atraso de aproximadamente 15 segundos devido à baixa vazão e ao comprimento da tubulação entre a resistência e o difusor da injeção, onde é medida a temperatura. Atrasos em geral estão associados a problemas de estabilidade para um controlador do tipo PID puro. Para corrigir esse problema, foi adicionado um controlador do tipo *feedforward* ao controle de  $T_{CAQi}$ , em que os valores de saída são calculados apenas com base nos valores de entrada, sem levar em consideração a resposta do sistema lida pelo sensor de saída.

Este controlador foi projetado tendo como base a equação fundamental da calorimetria  $\dot{Q} = \dot{m} * c_p * \Delta T$ . Dessa forma, o controlador *feedforward* implementado tem sua saída dada por  $q_{CAQ} * K_{ff} * (Setpoint - T_{CAQs})$ , em que  $K_{ff} = 0.0065$ . O controlador PID de  $T_{CAQi}$  passa então a ser responsável apenas pelo ajuste do erro em regime permanente do controlador *feedforward*, o que justifica possuir ganho apenas em seu termo integrativo. O sistema de controle da temperatura de injeção da CAQ está representado pelo diagrama de blocos da [Figura 23](#).

O desempenho dos controladores foi analisado pela medição do tempo de subida, do sobre-sinal e do tempo de assentamento ([OGATA, 1985](#)). O tempo de subida é o tempo necessário para que a curva de resposta vá de 10 a 90 % de seu valor final em relação à origem. O sobre-sinal é o quanto o valor máximo da resposta excede o valor desejado, sendo dado por  $(Valor\ máximo - Setpoint)/Setpoint * 100\%$ . O tempo de assentamento é a quantidade de tempo necessária para que a curva de resposta se acomode em uma faixa



Figura 23 – Diagrama de blocos do sistema de controle de temperatura de injeção da CAQ.

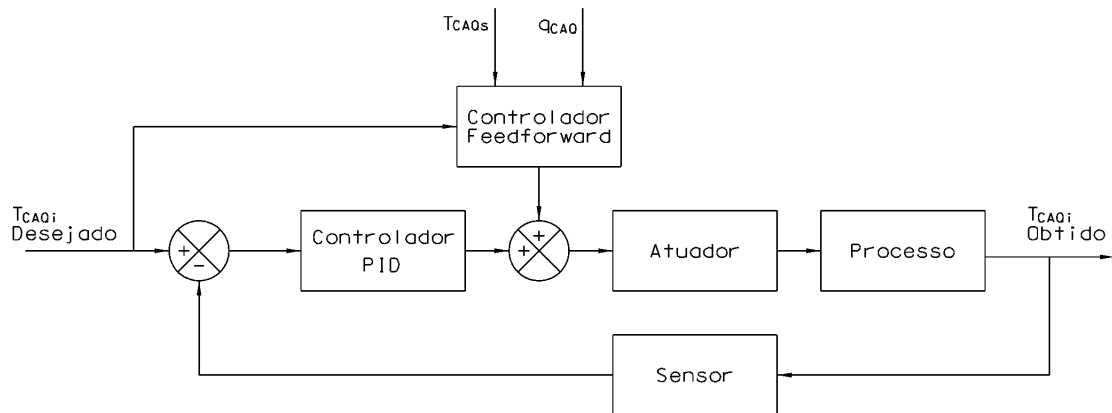


Tabela 8 – Ganhos dos controladores PID e dos circuitos de atuação

Parâmetro	Controlador				Entrada	Atuador Saída	Ganho
	$K_{global}$	P	I	D			
$q_{CAQ}$	0.255	0,1	0.35	0	0 a 255	0 a 12 V	0.0471
$T_{CAQ_s}$	1	0	0.01	0	0 a 200	0 a 220 V	1.1
$q_{PI}$	1	2	1.8	0.03	0 a 255	0 a 60 Hz	0.235
$T_{PI_s}$	0.04	20	1	0	0 a 100	0 a 220 V	2.2

de valor menor que  $\pm 5\%$  de seu valor em regime permanente.

### 3.7 Procedimento Experimental

A execução do experimento deve começar com a verificação das condições iniciais de teste, que consistem nas temperaturas da água da piscina e ambiente, para que então os parâmetros do controle da bancada sejam definidos. O processo de iniciação de um experimento consiste em:

1. Verificação geral da bancada, em que devem ser conferidos se todos os equipamentos estão em suas devidas condições, se há vazamentos, cabos elétricos desconectados ou corpos estranhos presentes no tanque ou sobre os circuitos elétricos.
2. Escorvação das bombas do circuito da piscina e da CAQ.
3. Ativação do quadro elétrico e do sistema de controle no computador.
4. Verificação no funcionamento de todos os equipamentos. Os circuitos hidráulicos se mostraram propensos à entrada de ar com o tempo, portanto é feita a ativação das bombas por cerca de 5 minutos em sua vazão máxima para retirada de ar das linhas.

5. Com a bomba do circuito da piscina ativa, é registrada a temperatura de entrada na chaminé, que é definida como a temperatura inicial da água da piscina. São registradas também a temperatura ambiente, a umidade e a hora de início do experimento. Estes dados compõem as condições iniciais no arquivo de registro do experimento.
6. Verificação do nível da água no tanque e das posições na sonda de termopares da CAQ.

Após o processo de inicialização do experimento a bancada já se encontra pronta para a realização de um novo teste. A sequência para a realização de um teste é:

1. Inserção das condições iniciais no programa de controle da bancada.
2. Determinação da temperatura de injeção da CAQ. Esse valor consiste da temperatura inicial da piscina somada ao delta de temperatura desejado para a CAQ mais um valor estimado para compensar as perdas térmicas. Essa estimativa se mostrou fácil de ser realizada com um pouco de prática e além disso esse valor pode ser corrigido após poucos minutos de funcionamento da bancada, quando é possível verificar se a CAQ está se formando com a temperatura correta.
3. Ativação da bancada para a realização do experimento.
4. Verificação se a CAQ está se formando à temperatura correta.
5. Desligamento do sistema após 17000 segundos.
6. Desligamento do quadro elétrico e esvaziamento da tubulação da CAQ.
7. Gravação dos dados para análise posterior.

O circuito da CAQ usa tubulação transparente de PTFE em sua maior parte, se mostrando susceptível à formação biológica quando com água. Portanto, foi observada a necessidade de se esvaziar o circuito da CAQ quando não mais em uso.

## 4 Resultados

Os resultados serão apresentados e discutidos em três seções. Na primeira é apresentada uma avaliação da bancada experimental quanto ao seu funcionamento e à sua resposta em relação às especificações requeridas para esse estudo. Na segunda parte são apresentados e analisados os resultados experimentais relativos à etapa de formação da CAQ. Na terceira parte são apresentados os resultados da etapa de perturbação da CAQ pelo acionamento do circuito da piscina e é feita uma comparação entre os resultados experimentais obtidos e o resultado das simulações numéricas realizadas por [Schweizer \(2014\)](#) para a CAQ formada com um delta de temperatura de 20 °C.

### 4.1 Avaliação da Bancada Experimental

O principal critério a ser avaliado em relação à bancada de testes é se ela é capaz de reproduzir as condições experimentais definidas para esse estudo, apresentadas na [seção 3.4](#). Isso implica em uma avaliação da resposta de seus sistemas de controle. Nessa seção são apresentadas e discutidas as respostas dos sistemas de controle da temperatura de injeção da CAQ, da temperatura de injeção do circuito da piscina e das vazões dos circuitos da CAQ e da piscina.

#### 4.1.1 Temperatura de injeção do circuito da CAQ

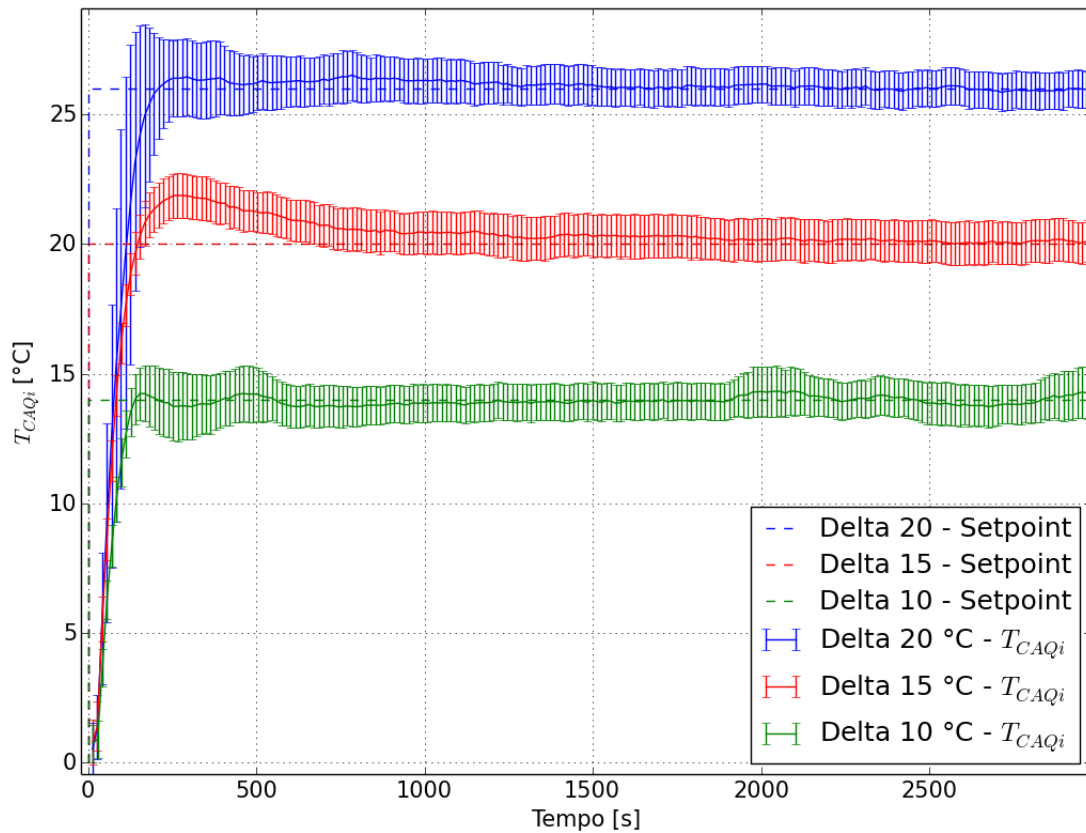
O gráfico da [Figura 24](#) apresenta a resposta do sistema de controle no início do experimento, quando a temperatura de injeção da CAQ é definida. A [Tabela 9](#) apresenta o tempo de subida, o sobre-sinal e o tempo de assentamento de  $T_{CAQi}$  para cada condição de formação da CAQ.

Tabela 9 – Desempenho do controle de  $T_{CAQi}$

$\Delta T$ CAQ [°C]	Setpoint [°C]	Tempo de subida [s]	Sobre-sinal [%]	Tempo de assentamento [s]
20	26	130	1,88	190
15	20	102	9,65	630
10	14	120	2,21	130

A condição de formação da CAQ a 15 °C foi a que apresentou o pior desempenho do controle de  $T_{CAQi}$ , com um tempo de assentamento de 630 segundos e um sobre-sinal de 9,65 %. Ainda assim, levando em consideração que o período de formação da CAQ é de 9000 segundos, pode-se considerar que o desempenho do controlador atende à necessidade do experimento para todas as condições.

Figura 24 – Gráfico da temperatura de injeção da CAQ em função do tempo no início do teste.



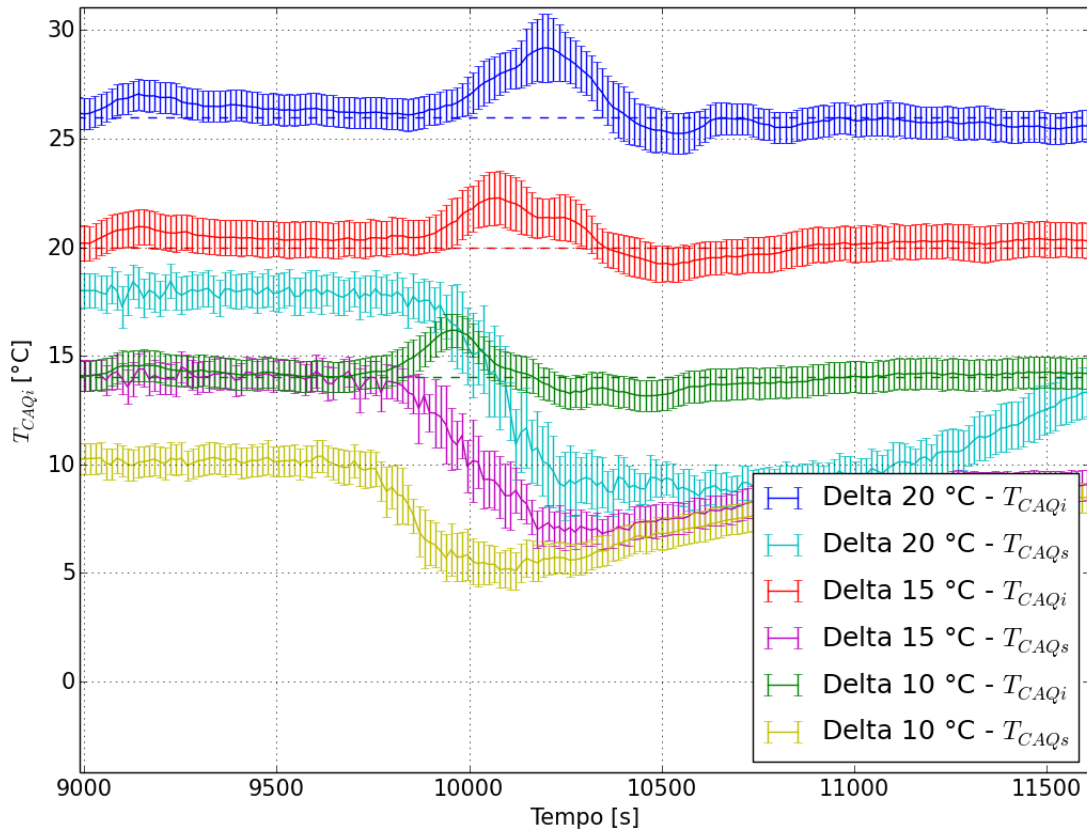
Após a ativação do circuito da piscina, quando a espessura da camada quente diminui, há uma perturbação no controle do  $T_{CAQi}$  devido à entrada de água fria na sucção do circuito da CAQ. Logo que a água mais fria entra pelo bocal de sucção,  $T_{CAQs}$  diminui, levando o controlador *feedforward* a elevar a potência de aquecimento. Como a água já presente na tubulação entre a sucção e a resistência ainda está a uma temperatura mais alta, há um pico de temperatura em  $T_{CAQi}$  como pode ser notado no gráfico da [Figura 25](#).

Considerando a inércia da CAQ em relação ao seu circuito, evidenciada pelo tempo necessário para a formação da camada quente, inferiu-se que essa perturbação não compromete a validade dos resultados obtidos. Uma sugestão para trabalhos futuros é retirar o termopar de  $T_{CAQs}$  do bocal de sucção e o instalar na entrada da resistência, reduzindo o comprimento de tubulação entre a medição da sucção e a resistência.

#### 4.1.2 Temperatura de injeção do circuito da piscina

O gráfico da [Figura 26](#) apresenta o comportamento de  $T_{PIi}$  durante a ativação do circuito da piscina. O sistema de controle apresenta um atraso de  $T = 120s$  em sua resposta à entrada em rampa. Antes que o controlador entre em regime permanente com a

Figura 25 – Perturbação na resposta de  $T_{CAQi}$  devido à entrada de água mais fria na sucção.



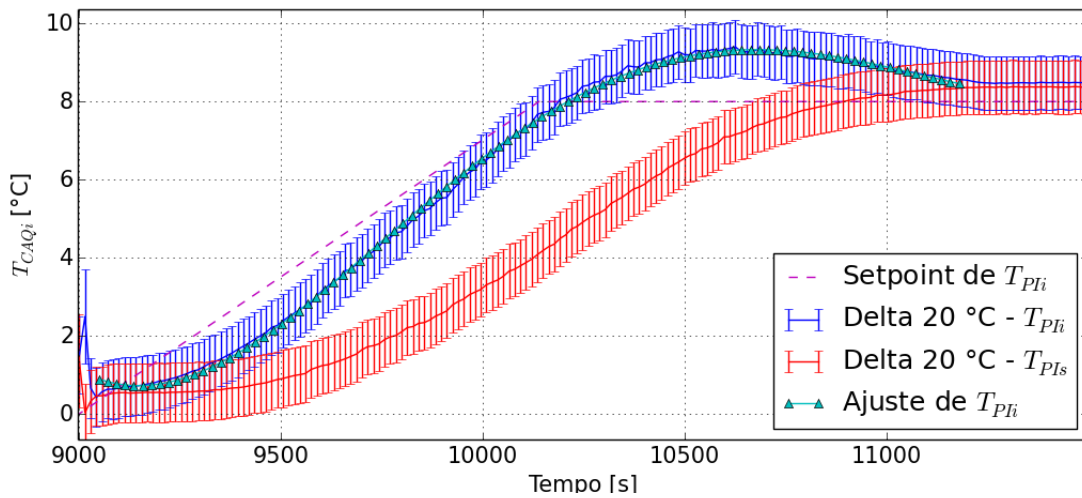
entrada em rampa, é estabelecido um valor desejado de  $T_{PIi} = 8^{\circ}C$ , com o controlador respondendo com um sobre-sinal de 16% (1,3 °C) e um tempo de assentamento de 850 segundos. Esse sobre-sinal leva a um aquecimento excessivo da piscina, que fica evidente pelo fato da temperatura de sucção ( $T_{PIs}$ ) ao fim da fase de aquecimento ser de 8,4 °C em relação à sua temperatura inicial.

O controle de  $T_{PIi}$  não foi capaz de seguir a rampa de entrada de forma precisa. Assim, para o uso dos resultados experimentais, pode ser necessário utilizar como condição de contorno a curva de temperatura medida durante o experimento. A Equação 4.1 foi obtida por ajuste polinomial de quarta ordem de  $T_{PIi}$ , e permite uma aproximação com a curva experimental durante o aquecimento da piscina.

$$T_{PIi} = 2.40360384 \times 10^{-12} * t^4 - 1.00099613 \times 10^{-7} * t^3 + 1.55687054 \times 10^{-3} * t^2 - 1.07141064 \times 10 * t + 2.75241438 \times 10^4 \quad (4.1)$$

para  $9050 < t < 11200$

Figura 26 – Perturbação na resposta de  $T_{CAQ_i}$  devido à entrada de água mais fria na sucção.



#### 4.1.3 Vazões do circuito da CAQ e da Piscina

As respostas dos sistemas de controle de vazão são rápidas demais para serem comparadas aos demais fenômenos do experimento. Uma vez que os dados experimentais de vazão são gravados aproximadamente a cada 14 segundos, seus transientes sequer são registrados, pois os valores desejados são obtidos em um intervalo de tempo menor.

## 4.2 Formação da CAQ

O gráfico da [Figura 27](#) apresenta a evolução da espessura da CAQ durante a sua formação, enquanto que a [Figura 28](#) apresenta perfis de temperatura para o mesmo período.

A espessura da CAQ aumenta por aproximadamente 4500 segundos até atingir um valor muito próximo do regime permanente. Entretanto pode ser observado para  $t = 4000s$  e  $t = 6000s$  na [Figura 28](#) que o perfil de temperatura ainda evolui consideravelmente, com o gradiente térmico na região da interface se intensificando e a temperatura ao longo da camada se tornando homogênea para profundidades menores que 133 mm. De  $t = 6000s$  em diante há pouca alteração na região homogênea, e o aquecimento da CAQ passa a influir mais na região abaixo do bocal de sucção, levando a um pequeno aumento na sua profundidade como verificado na [Figura 27](#) em  $t = 6300s$ . Pode-se perceber que não há diferença de comportamento na formação da CAQ para as temperaturas analisadas.

Figura 27 – Espessura da CAQ durante a sua formação.

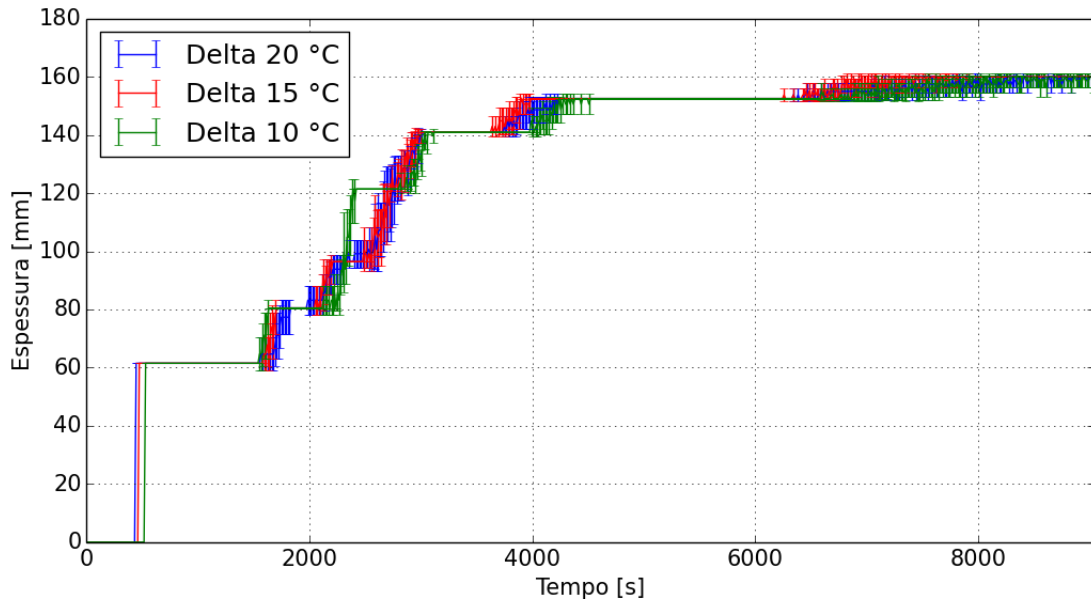
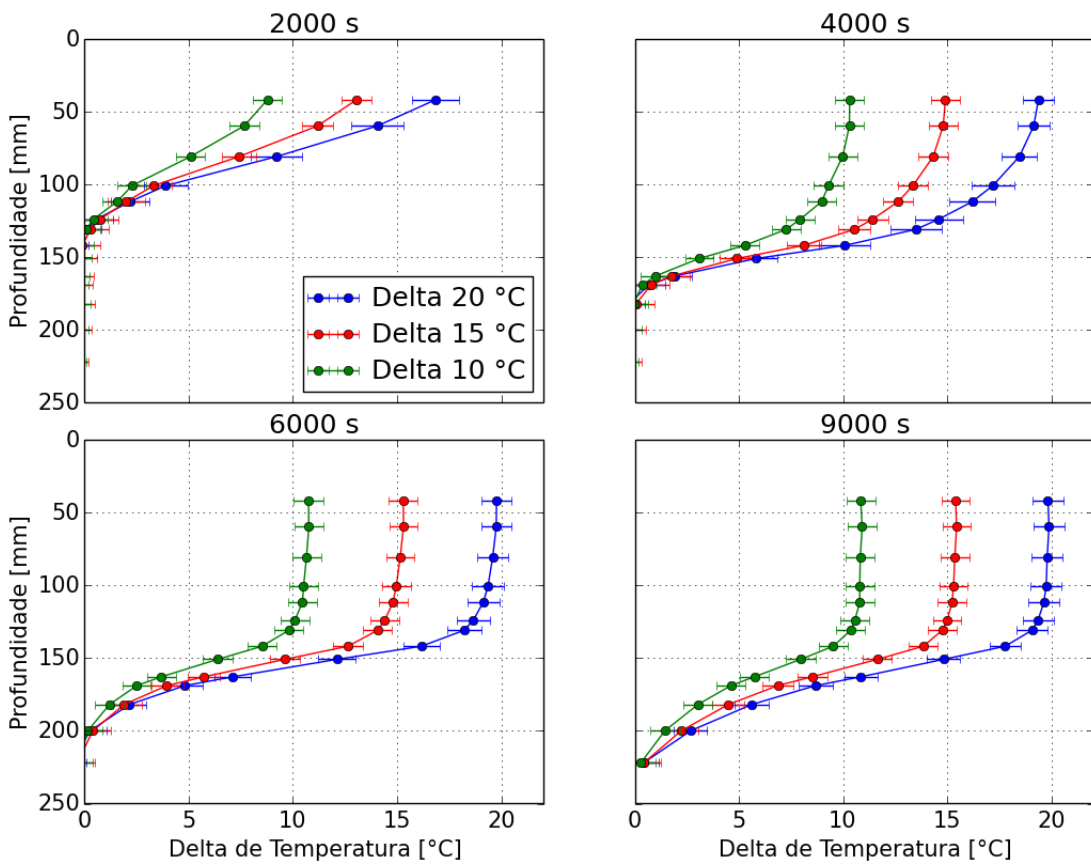


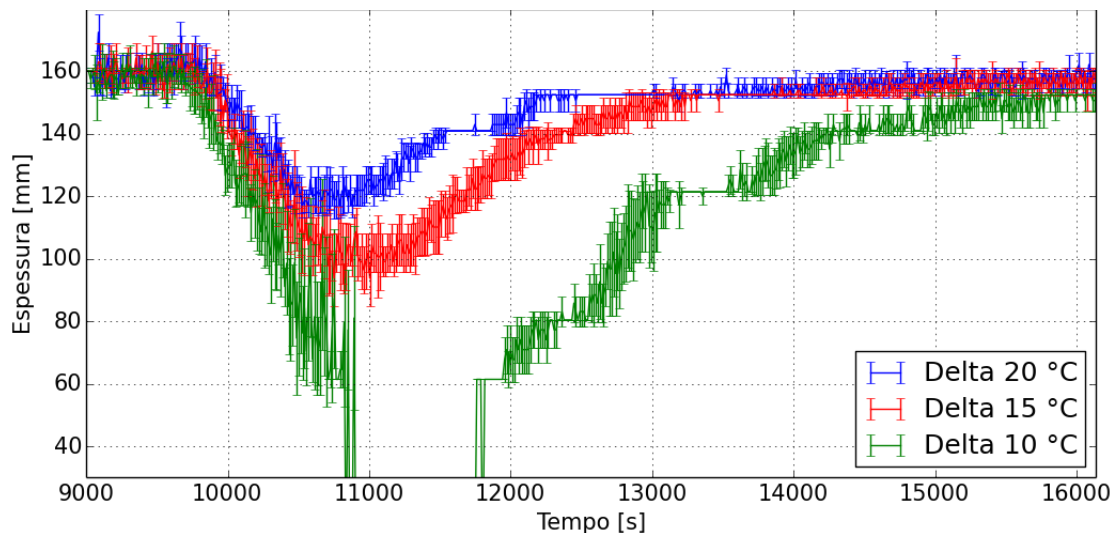
Figura 28 – Perfis de temperatura da CAQ durante sua formação.



### 4.3 Acionamento do Circuito da Piscina e Perturbação da CAQ

Nos gráficos da [Figura 29](#) e da [Figura 30](#) são apresentados a evolução da espessura e os perfis de temperatura da CAQ após a ativação do circuito da piscina. Até  $t = 9600s$  não se observa nenhuma perturbação significativa na CAQ. A partir deste momento, as plumas geradas pela injeção de água aquecida na piscina começam a chegar na interface da camada quente. Este escoamento produz uma mistura entre parte da água da piscina e da CAQ, levando a uma acentuada perda de espessura. As CAQs formadas a 20 e 15 °C perdem espessura até  $t = 10500s$  e  $t = 10700s$  respectivamente, e depois estabilizam. A CAQ formada a 10 °C perde espessura até  $t = 11800s$ , desintegrando em seguida por não haver mais uma estratificação térmica considerável.

Figura 29 – Espessura da CAQ após o acionamento do circuito da piscina.

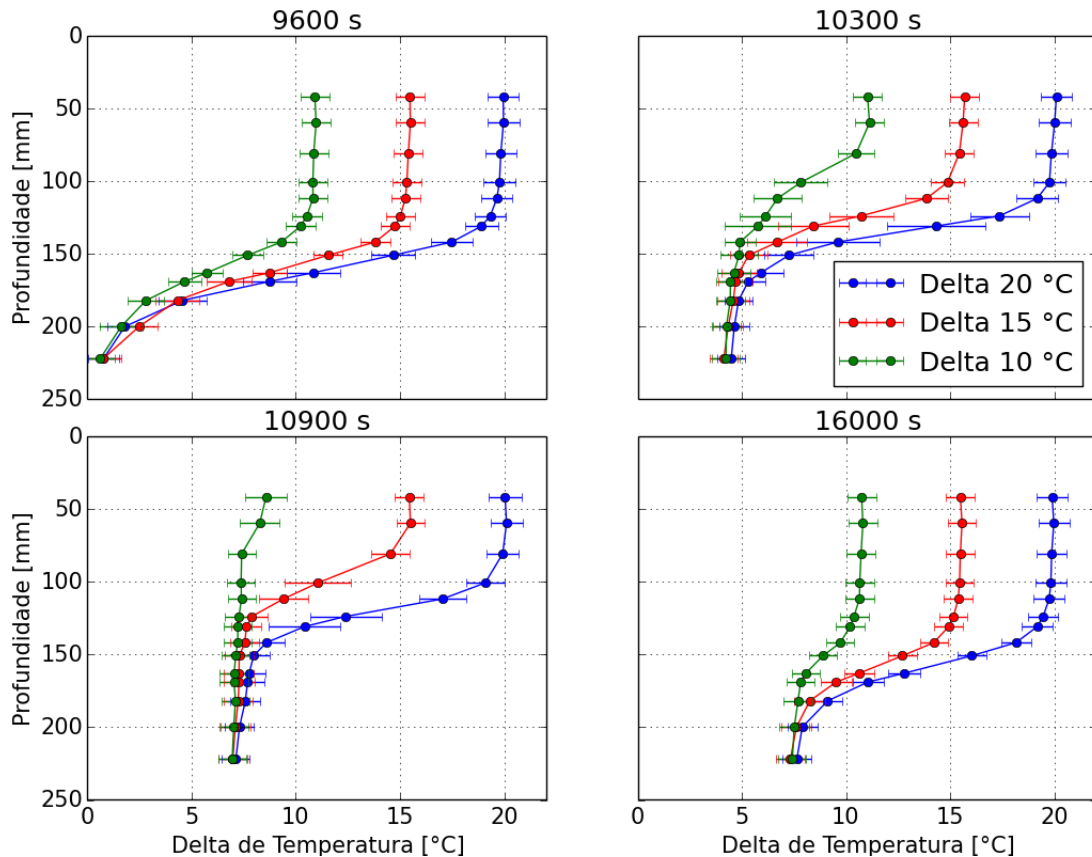


No gráfico da [Figura 30](#) se observa que, para as CAQs a 20 e 15 °C e  $t = 10900s$ , ainda se mantêm o forte gradiente térmico na região da interface e o patamar com temperaturas homogêneas na parte superior da camada. Isso significa que, nesses casos, a CAQ foi capaz de resistir ao aquecimento da piscina, e que no caso do reator real, seria capaz de manter a blindagem radiológica. A CAQ formada a 10 °C em relação a temperatura inicial da piscina não foi capaz de se manter nessa situação, mostrando que há um limite mínimo de temperatura de formação da CAQ para que esta seja eficaz.

Após esse período de máxima perturbação em  $t = 10900s$ , a temperatura da injeção do circuito da piscina ( $T_{PI}$ ) começa a se igualar com a temperatura da água no tanque, como apresentado na [Figura 26](#). As forças de empuxo que impulsionavam as plumas em direção a CAQ se extinguem e a perturbação na camada quente se minimiza. A partir de então a CAQ começa a se recuperar gradualmente, readquirindo sua espessura e seu perfil característico. No gráfico de perfil de temperatura da [Figura 30](#) para  $t = 16000s$ , se



Figura 30 – Perfis de temperatura da CAQ após o acionamento do circuito da piscina.



observa que a CAQ se reestabeleceu para todas as condições de teste.

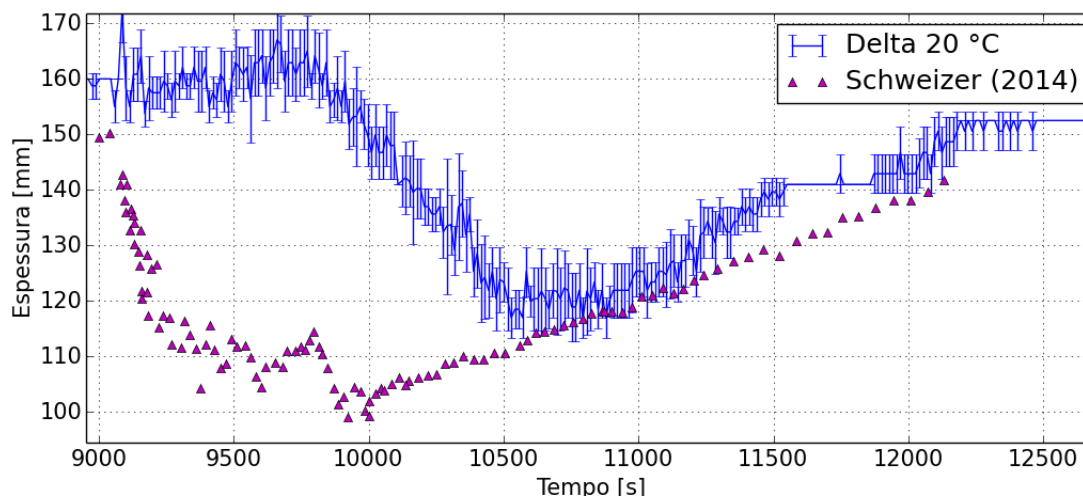
#### 4.3.1 Comparação com os resultados numéricos

Schweizer (2014) simulou a CAQ em uma geometria em escala 1/10 do RMB. Em seu modelo numérico, foi simulada uma CAQ formada a 45 °C com a temperatura inicial da piscina de 25 °C. As condições de contorno empregadas foram as estimadas para o RMB aplicando a similaridade pelo número de Froude, conforme apresentado na seção 3.4. Entretanto, nesta análise numérica foi simulada tanto a piscina do reator como a piscina de serviço, enquanto que no experimento havia água apenas na piscina do reator.

Ainda assim, como apresentado no gráfico da Figura 31, é possível notar semelhanças no comportamento das curvas de espessura da CAQ entre os dois trabalhos. Embora as espessuras em regime permanente se distingam, a diminuição da espessura em ambos os casos é próxima, sendo de aproximadamente 40 e 45 milímetros no estudo experimental e numérico respectivamente. Verifica-se também que a taxa de redução da CAQ no trabalho numérico é maior, enquanto que a taxa de crescimento durante a recuperação da CAQ é muito semelhante entre os dois trabalhos. A maior diferença está no instante em que a CAQ começa a perder espessura, com o experimento demonstrando que há um tempo

entre o acionamento do circuito da piscina e a perturbação da camada quente, enquanto que na simulação a perturbação foi imediata.

Figura 31 – Gráfico da espessura obtida experimentalmente para a CAQ formada a 20 °C e o resultado numérico obtido por Schweizer (2014).



## 5 Conclusões

Neste estudo foi apresentada uma metodologia experimental para a análise do sistema da Camada de Água Quente (CAQ) no Reator Multiprósito Brasileiro (RMB). Foi utilizada a bancada experimental em escala de 1/10 da piscina do reator desenvolvida no CDTN. Foram analisados os efeitos da diferença de temperatura entre a CAQ e a água da piscina na estabilidade da camada quente durante a fase de partida do reator.

Para o desenvolvimento do experimento, primeiro foram projetados os sistema de medição, de controle e os componentes internos faltantes na bancada de testes. A instalação foi capaz de gerar resultados que permitiram analisar o comportamento do sistema da CAQ para a condição proposta. Entretanto verificou-se a necessidade de se melhorar o controlador da temperatura de injeção do circuito da piscina devido à dificuldade do sistema atual em reproduzir a condição de entrada em rampa.

As conclusões mais relevantes deste estudo foram:

- Dentro das condições analisadas, a temperatura da CAQ em relação à piscina não tem efeitos sobre seu comportamento durante sua formação.
- A temperatura da CAQ em relação à piscina tem relação direta com a sua capacidade de reter espessura após o acionamento do circuito da piscina. Para as temperaturas de 20 e 15 °C a CAQ sobreviveu, com uma perda de espessura mais acentuada no último caso. A CAQ formada com um delta de temperatura de 10 °C não resistiu ao acionamento do circuito da piscina e se desfez, representando um caso de perda de blindagem radiológica.
- Após a equalização nas temperaturas de injeção e da água da piscina, a CAQ recuperou sua espessura e perfil em todos os casos, embora de forma consideravelmente mais lenta para a temperatura de formação de 10 °C.
- Os resultados de [Schweizer \(2014\)](#) apresentaram algumas semelhanças com os resultados experimentais deste trabalho quanto à evolução da espessura da CAQ durante o transiente do reator. Embora as espessuras obtidas difiram em 10 milímetros, a perda de espessura foi próxima, sendo de 45 e 40 milímetros para o estudo numérico e o experimental respectivamente. Verificou-se também que a taxa de crescimento da CAQ durante sua recuperação foi muito próxima.

Os experimentos se mostraram consistentes e com boa repetibilidade. Com poucos ajustes, como os citados ao longo deste trabalho, a bancada experimental poderá realizar

outros trabalhos que aprofundem o estudo da CAQ do RMB, subsidiando o desenvolvimento desse importante projeto do Programa Nuclear Brasileiro.

## 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Melhorar o projeto do sistema de controle da injeção da piscina, dando maior flexibilidade às condições de partida possíveis de serem representados pela bancada.
- Realização de simulações numéricas utilizando as condições reais do experimento. Esse estudo permitirá a formulação de uma metodologia numérica para o estudo da CAQ, sendo uma importante ferramenta para o projeto do RMB.
- Utilizar técnicas óticas de medição de velocidade, tais como o *Laser Doppler Velocimetry* (LDV) e o *Particle Image Velocimetry* (PIV), para se compreender melhor os perfis de velocidade da água no interior da piscina. Com estes dados, trabalhos numéricos futuros podem validar melhor os seus resultados. Também pode-se melhorar o desempenho dos difusores de injeção ao se entender melhor o escoamento nessas regiões.

# Referências

- AIEA. *Application of Research Reactors*. [S.l.], 2014. Disponível em: <[www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1627\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1627_web.pdf)>. Acesso em: 08 nov. 2017. Citado na página 14.
- BAPTISTA, B. D. Desenvolvimento do sistema da camada quente do reator iea-r1 do ipen. In: *6o Congresso Geral de Energia Nuclear*. [s.n.], 1995. Disponível em: <[repositorio.ipen.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/12776/03603.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ipen.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/12776/03603.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 18 out. 2017. Citado na página 16.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. *Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008: Avaliação de dados de medição*. Rio de Janeiro, 2012. 126 p. Citado na página 35.
- INVAP. *Preliminary Safety Analysis Report for ANSTO Replacement Research Reactor Facility*. [S.l.: s.n.], 2001. Citado na página 26.
- INVAP. *Safety Analysis Report for ANSTO Replacement Research Reactor Facility*. [S.l.: s.n.], 2004. Citado 4 vezes nas páginas 18, 20, 21 e 26.
- METCALF, P. Distributed control systems: Linear design options and analysis for a reactor hot water layer system. In: *2010 IEEE International Conference on Control Applications*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 2421–2425. Citado na página 20.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. Englewood, NJ, USA: Prentice-Hall do Brasil, 1985. Citado na página 39.
- PERROTTA, J. A.; SOARES, S. J. Rmb: The new brazilian multipurpose research reactor. In: *45th Annual Meeting on Nuclear Technology*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 30–34. Citado 3 vezes nas páginas 12, 16 e 18.
- RIBEIRO. *Análise Experimental e Computacional da Camada de Água Quente para Proteção Radiológica em Reatores de Piscina*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 1995. Citado na página 29.
- SCHWEIZER, F. L. A. *Análise Numérica e Projeto de Experimento em Escala do Sistema da Camada de Água Quente do Reator Multipropósito Brasileiro*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Nuclear, Belo Horizonte, 2014. Citado 13 vezes nas páginas 8, 9, 12, 13, 19, 26, 29, 31, 32, 42, 48, 49 e 50.
- SHOKR, A. M. Performance analyses of the pool-top radiation level reduction systems at the etrr-2 research reactor. *Kerntechnik*, v. 71, n. 3, p. 130–133, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 23.
- SOARES, H. V. et al. Analysis of loss of flow events on brazilian multipurpose reactor using the relap5 code. *International Journal of Nuclear Energy*, v. 2014, p. 12, 2014. Citado na página 17.