



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E
NUCLEARES**

THIAGO SOUZA PEREIRA DE BRITO

**DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE BORO NO
PRESSURIZADOR DE UM SMR**

Recife

2023

THIAGO SOUZA PEREIRA DE BRITO

**DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE BORO NO
PRESSURIZADOR DE UM SMR**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares.
Área de Concentração: Engenharia de Reatores.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

Recife

2023

Catálogo na fonte:

B862d Brito, Thiago Souza Pereira de.
Distribuição temporal da concentração de boro no pressurizador de um SMR/
Thiago Souza Pereira de Brito. – 2023.
122 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Recife, 2023.
Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia nuclear. 2. SMR. 3. Boro. 4. CFD. 5. Simulação. 6. Dispersão.
I. Lira, Carlos Alberto Brayner de Oliveira (orientador). II. Título.

621.48 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2023-251

THIAGO SOUZA PEREIRA DE BRITO

**DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE BORO NO
PRESSURIZADOR DE UM SMR**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares.
Área de Concentração: Engenharia de Reatores.

Aprovado em 27/07/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner De Oliveira Lira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. LEORLEN YUNIER ROJAS MAZAIRA
(Examinador Externo a Instituição)

Prof. Dr. DANIEL GONZÁLEZ RODRIGUEZ
(Examinador Externo a Instituição)

Prof. Dr. MARIO AUGUSTO BEZERRA DA SILVA
(Examinador Externo ao Programa)

À minha avó Iraci Izidora de Souza (*in memoriam*), pelo exemplo
de vida, superação e sabedoria.

Aos meus pais Edvaldo Pereira de Brito e Maria Izidora Souza
de Brito, pela paciência, incentivo e apoio.

A minha esposa Maria Janiele Bezerra da Silva Brito, pelo
suporte sempre presente.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as coisas e oportunidades que me foram concebidas, pela sua palavra que sempre me direciona para o caminho certo a ser percorrido, pela graça concedida e as incontáveis bençãos recebidas. Mesmo com meus defeitos, erros e pecados, Ele não me abandona. Meu tributo deixo a Ele e a Ele seja toda Glória.

A minha mãe, Maria Izidora, que sempre me observa, critica, dialoga, orienta e apoia para que eu cresça cada dia mais na vida em caráter e cidadania. Ao meu pai, Edvaldo Brito, que em meio a tantas adversidades tem se erguido dia após dia, lutando e liderando a família, dando um exemplo de vida, perseverança e determinação. Aos meus irmãos, Edvaldo Jr., Edson, Isaac, Niedja Sarah, André Felipe e Joel David, que me apoiam sempre que preciso. A minha esposa Maria Janiele, que dividiu essa trincheira comigo e me deu suporte nos altos e baixos desse trabalho.

Ao meu Orientador Prof. Carlos Brayner, por ter me aceito, pela paciência, confiança, por mostrar o melhor caminho para atingir os objetivos. Um dos grandes responsáveis pelo meu desenvolvimento acadêmico, e, pelo fazer acontecer neste trabalho. Não tenho palavras para descrever a imensa gratidão.

Aos Professores Mário Bezerra, Jair Bezerra, Fernando Lima e Vinícius Saito por contribuir no meu desenvolvimento, esclarecendo dúvidas, orientando e apoiando sempre que precisei.

Aos amigos e colegas do grupo de engenharia de reatores que ao longo desses anos me ajudaram e contribuíram com o desenvolvimento da pesquisa, em especial Luís Felipe, Leorlen, Caio, Daniel González, Daniel Milan, Abel e Samira

A todos os servidores do CRCN-NE que me orientaram quando as normas e práticas no centro e me ajudaram sempre que precisei, em especial Renata Sales, Elvis Maranhão, Nalber e Suy Wang.

A equipe da gestão da unidade de ensino básico estadual, onde sou servidor, Eduardo Generoso, Regina Celly e Rafael, pela orientação e liberação na reta final para defesa deste trabalho. Aos funcionários da UDP GRE-Metro Sul, em especial a professora Anaílde e professor Lisboa pela condução do meu processo de afastamento.

Aos meus amigos da UFRPE, onde sou servidor, Adilson Alves e Ricardo Belchior pela orientação e substituição das atividades laborais.

A todos meus amigos que me ajudaram direta e indiretamente na construção desta tese.

RESUMO

Esta tese concentra-se na análise da dispersão de boro em um pressurizador de um Reator Modular Compacto e Integral (RMCI), uma promissora tecnologia nuclear devido à sua segurança aprimorada e eficiência econômica. Para melhor compreensão desse processo, foram realizados experimentos em uma planta em escala reduzida de um pressurizador de um RMCI no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE). Os experimentos envolveram a análise da dispersão de boro no pressurizador, que foram comparados a simulações computacionais realizadas na plataforma ANSYS CFX. Os resultados mostraram uma correspondência notável entre as simulações e os dados empíricos no caso dos eventos de deborção, com divergências máximas variando de 7% a 9%. Contudo, os eventos de boração apresentaram divergências significativas entre os dados simulados e empíricos, destacando a complexidade desses sistemas e a necessidade de melhorias nos modelos de simulação. Portanto, a pesquisa conclui que, apesar de algumas discrepâncias, as simulações computacionais desempenham um papel vital na modelagem desses eventos complexos, mas enfatiza a importância da validação prática contínua para aperfeiçoar e garantir a confiabilidade desses modelos. A pesquisa abre caminho para estudos futuros voltados para aprimorar as simulações computacionais e a validação desses modelos em uma gama mais ampla de cenários experimentais.

Palavras-chave: SMR, boro, CFD, simulação, dispersão.

ABSTRACT

This thesis focuses on the analysis of boron dispersion in a pressurizer of a Small and Integral Modular Reactor (SIMR), a promising nuclear technology due to its enhanced safety and economic efficiency. To better understand this process, experiments were conducted on a downscaled plant of a SIMR pressurizer at the Northeast Regional Center for Nuclear Sciences (CRCN-NE). The experiments involved the analysis of boron dispersion in the pressurizer, which were compared to computational simulations performed on the ANSYS CFX platform. The results showed a remarkable match between simulations and empirical data in the case of deboration events, with maximum discrepancies ranging from 7% to 9%. However, borating events showed significant discrepancies between simulated and empirical data, highlighting the complexity of these systems and the need for improvements in simulation models. The research concludes that, despite some discrepancies, computational simulations play a crucial role in modeling these complex events, but emphasizes the importance of ongoing practical validation to refine and ensure the reliability of these models. The research paves the way for future studies aimed at improving computational simulations and validating these models across a broader range of experimental scenarios.

Keywords: SMR, boron, CFD, simulation, dispersion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Diagrama de uma central nuclear PWR Geração II.....	18
Figura 2	– Vaso de pressão de um reator nuclear.....	25
Figura 3	– Corte do vaso de pressão em perspectiva.....	26
Figura 4	– Formação do núcleo do reator.....	27
Figura 5	– Reator PWR com quatro sistemas primários.....	29
Figura 6	– Pressurizador.....	30
Figura 7	– SMR na configuração iPWR.....	35
Figura 8	– Layout do reator IRIS.....	37
Figura 9	– Pressurizador do IRIS.....	40
Figura 10	– Reatividade vs Concentração de Boro vs Tempo.....	45
Figura 11	– Esquema inicial da bancada experimental.....	52
Figura 12	– Seção de Teste.....	53
Figura 13	– Esquema modificado da bancada experimental.....	55
Figura 14	– Princípio de medição (tubo Z simples) - Layout do tubo medidor, vista superior.....	57
Figura 15	– Arduino UNO (esquerda) e Sensor de distância ultrassônico HC-SR04 (direita).....	59
Figura 16	– Arduino e sensor instalados na ST.....	60
Figura 17	– FiedLogeer – Data Logger Industrial Multicanais.....	61
Figura 18	– Circuito de entrada versão 1.....	62
Figura 19	– Circuito de saída versão 2.....	63
Figura 20	– Circuito de entrada versão 2.....	63
Figura 21	– Circuito de saída versão 2.....	64
Figura 22	– Circuito de entrada versão final.....	65
Figura 23	– Circuito de saída versão final.....	65
Figura 24	– Nova configuração da bancada experimental.....	66
Figura 25	– Condutividade elétrica da solução de Ácido Bórico em água destilada em função concentração de Ácido Bórico na solução.....	71
Figura 26	– Condutividade elétrica da solução de Cloreto de Sódio em água destilada em função concentração de Cloreto de Sódio na solução.....	72

Figura 27	– Região de interesse na simulação.....	74
Figura 28	– Geometria.....	75
Figura 29	– Malha gerada na geometria.....	76
Figura 30	– Condição inicial da bancada experimental nos experimentos de deboração.....	81
Figura 31	– Condição inicial da bancada experimental nos experimentos de boração.....	83
Figura 32	– Gráfico Experimento versus CFD – Deboração 1000 ppm.....	85
Figura 33	– Gráfico Experimento versus CFD – Deboração 1500 ppm.....	86
Figura 34	– Gráfico Experimento versus CFD – Deboração 2000 ppm.....	86
Figura 35	– Gráfico Experimento versus CFD – Deboração 2500 ppm.....	86
Figura 36	– Gráfico Experimento versus CFD – Boração 1000 ppm.....	87
Figura 37	– Gráfico Experimento versus CFD – Boração 1500 ppm.....	88
Figura 38	– Gráfico Experimento versus CFD – Boração 2000 ppm.....	88
Figura 39	– Gráfico Experimento versus CFD – Boração 2500 ppm.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Projeto e status dos principais SMRs refrigerado por água em desenvolvimento.....	23
Tabela 2	– Principais parâmetros do projeto IRIS.....	38
Tabela 3	– Principais parâmetros do IRIS e da seção de testes.....	41
Tabela 4	– Parâmetros da malha desenvolvida para os eventos de boração e deboração.....	77
Tabela 5	– Condição inicial dos experimentos de deboração.....	82
Tabela 6	– Condição inicial dos experimentos de boração.....	84
Tabela 7	– Diferenças percentuais entre os dados dos experimentos de deboração e a simulação computacional.....	90
Tabela 8	– Diferenças percentuais entre os dados dos experimentos de boração e a simulação computacional.....	91

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Geral.....	15
1.1.2	Específicos.....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	REATORES NUCLEARES.....	16
2.2	SMALL MODULAR REACTORS.....	20
2.3	REATORES A ÁGUA PRESSURIZADA (PWR).....	25
2.3.1	Pressurizador de um reator PWR.....	29
2.4	REATORES PWR DE CONFIGURAÇÃO INTEGRAL.....	34
2.4.1	Pressurizador do iPWR.....	38
2.5	FUNÇÃO DO BORO NO REATOR NUCLEAR.....	43
2.5.1	Análise da dispersão/concentração do boro.....	44
2.6	SIMULAÇÃO EM CFD (<i>Computational Fluid Dynamics</i>).....	47
2.6.1	ANSYS CFX.....	49
2.7	ARDUÍNO.....	49
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
3.1	BANCADA EXPERIMENTAL.....	51
3.2	METODOLOGIA.....	56
3.2.1	Calibração e manutenção dos instrumentos.....	56
3.2.2	Instrumentação.....	58
3.2.2.1	<i>Sensor de nível na seção de testes (ST), tanque de boração (TB) e tanque de diluição (TD).....</i>	58
3.2.2.2	<i>Sistema de aquisição de dados.....</i>	60
3.2.3	Nova configuração da bancada experimental.....	62
3.2.4	Realização de ensaio da bancada experimental.....	67
3.3	PREPARAÇÃO E ETAPAS ANTERIORES À REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	69
3.3.1	Escolha do elemento traço.....	70
3.3.2	Simulação CFD da bancada experimental.....	73
3.3.2.1	<i>Construção da geometria.....</i>	74
3.3.2.2	<i>Elaboração da malha.....</i>	76

3.3.2.3	<i>Delimitação do problema - condições de contorno e iniciais.....</i>	78
4	REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTOS.....	80
4.1	EXPERIMENTOS DE DEBORAÇÃO (1000, 1500, 2000 E 2500 PPM).....	80
4.2	EXPERIMENTOS DE BORAÇÃO (1000, 1500, 2000 E 2500 PPM)....	82
5	RESULTADO DOS EXPERIMENTOS.....	85
5.1	RESULTADO DOS EXPERIMENTOS DE DEBORAÇÃO (1, 2, 3 E 4).....	85
5.2	RESULTADO DOS EXPERIMENTO DE BORAÇÃO (5, 6, 7 E 8).....	87
6	ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS E CFD.....	89
7	CONCLUSÕES.....	93
	REFERÊNCIAS.....	95
	APÊNDICE A – GRÁFICO DOS DADOS COLETADO PELO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DA BANCADA EXPERIMENTAL.....	105
	APÊNDICE B – DADOS DAS MEDIÇÕES DE CONDUTIVIDADE.....	117

1 INTRODUÇÃO

Diante do cenário ambiental do mundo atual, o desenvolvimento de fontes energéticas de baixo custo, maior operacionalidade e segurança, são questões de necessidade da espécie humana. Ao longo da história, na geração de energia nuclear, a redução de custos, eficiência, tempo construção, retorno de capital e praticidade são alguns dos fatores cruciais na implementação de centrais nucleares. Outros fatores, que mais uma vez voltam a ser evidenciado após o acidente na Usina Nuclear de Fukushima-Japão, em 2011, são segurança, prevenção e contenção de acidentes.

Os reatores Compactos e Integrais, ou em sua língua materna *Small Modular Reactors* (SMR), vem preenchendo esses requisitos de forma satisfatória. Os SMRs são reatores modulares compactos variantes dos reatores de geração III+ que apresentam características atrativas, como a simplicidade, maior segurança e são economicamente competitivos. O termo "modular", significa que um único reator pode ser agrupado com os outros para formar uma grande planta nuclear, e, seu projeto é constituído principalmente por módulos pré-fabricados que são montados no local (Locatelli; Bingham; Mancini, 2014).

Reatores modulares compactos são vistos pela indústria de energia nuclear como a tecnologia mais promissora do futuro porque evitam muitos dos problemas de segurança de usinas muito maiores, e também são mais fáceis e rápidos de construir. A indústria busca nos novos reatores (SMR) requisitos para sistemas de segurança passiva melhorados para o licenciamento, após o acidente de Fukushima, no Japão. Eles também serão produzidos de fábrica como conjuntos de montar, prontos para serem construídos *in loco*, e assim evitar os atrasos nas obras e os vastos custos de capital de grandes reatores (Bhowmik *et al.*, 2023; Brown, 2014).

Os reatores nucleares são sistemas físicos que tem comportamento de natureza não- linear e suas variáveis operacionais variam com o tempo como uma função do nível de potência. Estas características devem ser consideradas se ocorrerem grandes variações de potência no regime de trabalho de uma usina nuclear. Em um reator refrigerado a água, do tipo PWR (reator de água pressurizada), a reatividade é controlada diluindo-se ácido bórico na água e ativando as barras de controle no circuito primário. O boro, devido sua seção de choque, é considerado um eficiente absorvedor nêutrons, principalmente na absorção de nêutrons térmicos. Nos últimos anos, houve um aumento nos estudos sobre os eventos da diluição de boro

que poderiam levar a transiente de reatividade (Hertlein *et al.*, 2003; Huang; Wang; Yuann, 2023; Lira; Lima; Silva, 2023; Magalhães, 2010; Silva, Mário A. B., 2008; YU *et al.*, 2020).

Entretanto, o método de diluição não é suficiente para controlar a reatividade, já que a mudança na concentração de boro não atua tão rapidamente para satisfazer os requisitos de segurança, como fazem as barras de controle. A distribuição de concentração de boro depende de fatores como, por exemplo, a geometria do caminho do escoamento, a injeção de água pura ou solução diluída de boro e a transferência de calor nos regimes de vaporização-condensação (Silva; Mário, 2008).

Atualmente, há muitos projetos com características estruturais distintas, como potência, tipo de combustível e frequência de abastecimento. O SMR que será estudado é um reator do tipo PWR (reator de água pressurizada) que possui o sistema integrado (iPWR). Esse sistema é caracterizado pela inclusão de todo o sistema primário dentro do vaso de pressão, incluindo o gerador de vapor e o pressurizador.

O pressurizador é um tanque fechado, isolado termicamente do exterior e preenchido com água em estado líquido e vapor saturado. Sua função é controlar as variações de pressões que ocorrem no sistema primário do reator. Ele é composto basicamente de uma linha de alimentação chamada de linha de compensação volumétrica ou linha de surto, que está ligada diretamente ao sistema de refrigeração (perna quente) do circuito primário; um aspersor, responsável por borrifar água (*spray* de água) da perna fria do reator para auxiliar na condensação do vapor; e, aquecedores, responsáveis por fornecer calor à água para auxiliar na formação de vapor.

Como os iPWRs apresentam uma configuração diferente da dos reatores PWRs tradicionais, outro mecanismo de circulação é adotado para a homogeneização das concentrações de boro, o que pode causar transitórios de potência. Diante dessa possibilidade, destaca-se a necessidade de estudos para descrever esse comportamento. Então, devido a esta nova disposição de funcionamento de um reator, testes e desenvolvimento de ferramentais se fazem necessários para a análise da dispersão do boro no controle de transitórios em um iPWR (Bezerra *et al.*, 2012; Bezerra; Lira; Barroso; Lima; Silva, 2013; Lira; Lima; Silva, 2023; Nascimento *et al.*, 2017; Nascimento, 2016).

No Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), órgão vinculado à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) em Recife (PE), foi

construído uma bancada experimental simplificada de baixa pressão em escala reduzida de um pressurizador de um SMR (Bezerra *et al.*, 2012). A fim de investigar e obter informações mais precisas da diluição do boro no pressurizador de um SMR, algumas modificações na estrutura da bancada experimental podem garantir à similaridade entre o sistema original e o modelo experimental em escala reduzida (Lira; Lima; Silva, 2023).

1.1 OBJETIVOS

Nesta sessão serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

1.1.1 Geral

Analisar temporalmente a dispersão de boro em uma bancada experimental em escala reduzida de pressurizador de um Reator Modular Compacto e Integral.

1.1.2 Específicos

- Redesenhar o circuito da planta reduzida para um melhor aproveitamento dos orifícios de entrada e saída da bancada experimental e medição do comportamento da distribuição de boro;
- Instrumentalizar com dispositivos de monitoramento e software especializado para a coleta de dados, focando na medição dos parâmetros de vazão, nível, temperatura e condutividade nas entradas e saídas da bancada experimental;
- Comparar com código CFD os resultados obtidos bancada experimental.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 REATORES NUCLEARES

O futuro da humanidade encontra-se indissociavelmente atrelado à energia nuclear. Diante do aumento populacional global e da sua subsequente estabilização, a demanda por energia para assegurar condições de vida adequadas exaurirá de forma significativa os recursos disponíveis, particularmente os associados aos combustíveis fósseis. Entender os benefícios e riscos associados a essa forma de energia é crucial para enfrentar os desafios emergentes de forma sustentável. É imperativo, portanto, que a energia nuclear, como método de conversão de energia, seja investigada e implementada de maneira prática (Murray, 2009).

No final de 2021, a capacidade total de energia nuclear do mundo era de 389,5 GW(e), fornecida por 437 reatores de energia nuclear em operação em 32 países. Os países continuaram demonstrando adaptabilidade à pandemia do COVID-19, adotando medidas eficazes para garantir uma operação segura e confiável, minimizando os riscos para a equipe, refletindo uma forte cultura organizacional (IAEA, 2022a).

O crescimento econômico, a prosperidade e o aumento da população levarão inevitavelmente ao aumento do consumo de energia nas próximas décadas. O mundo muda a cada dia com os desenvolvimentos da economia, as alterações climáticas e a energia trazendo novos desafios e novas oportunidades. Expandir a oferta de energia elétrica e simultaneamente reduzir os efeitos das mudanças climáticas é o desafio que se apresenta aos formuladores de políticas energéticas. A substituição de 137 reatores nucleares em término de vida útil, nos próximos 20 anos, quer por outros nucleares, quer por outras fontes energéticas, é uma questão que exigirá investimentos muito expressivos de todos os países envolvidos (Eletronuclear, 2016).

As perspectivas de crescimento e longo prazo continuam centradas na Ásia, particularmente na China. Dos 61 reatores em construção, 40 estavam na Ásia, assim como 47 dos 55 reatores conectados à rede desde 2005. Isso representa um aumento de cerca de 8,3 GW(e)¹ na capacidade total, em comparação com 2015. Dos reatores operacionais, 82% são moderados e refrigerados com água leve; 10,9% são

¹ Giga Watts elétricos.

moderados e refrigerados com água pesada; 3,3% são refrigerados com água pesada e moderados com grafite, e, 3,1% são reatores refrigerados a gás. Três são reatores rápidos refrigerados com metal líquido (IAEA, 2017).

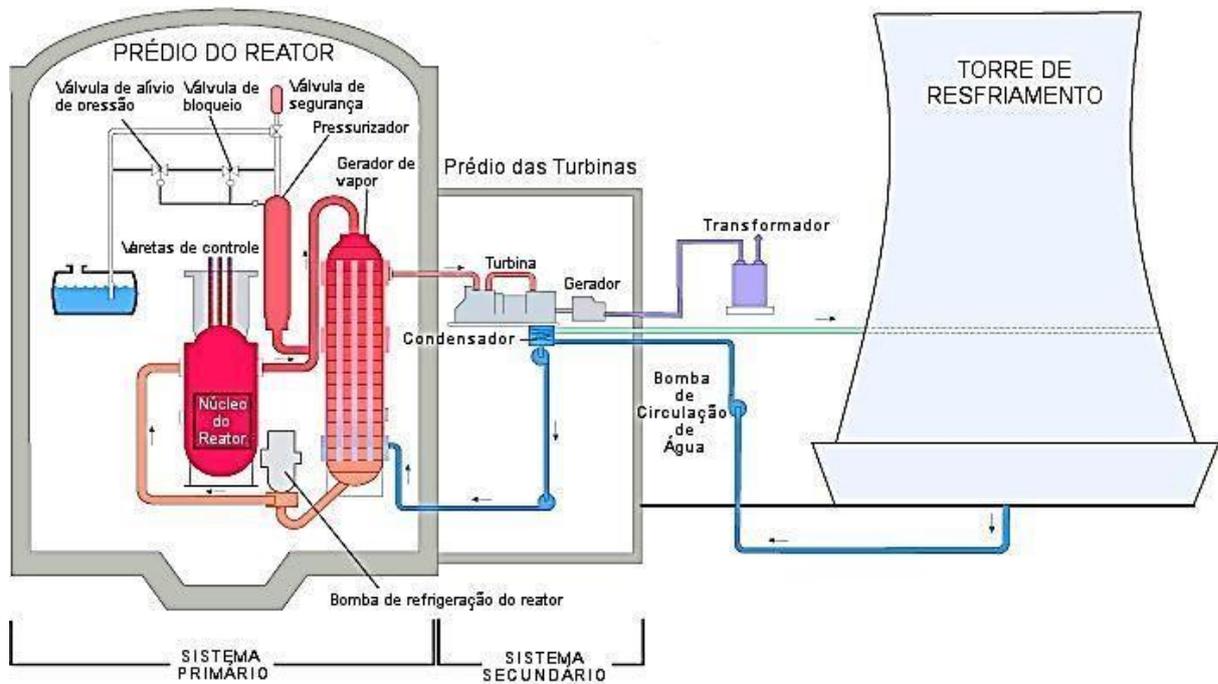
No geral, a capacidade de energia nuclear aumentou gradualmente na última década, incluindo cerca de 20,7 GW(e) de aumento de capacidade como resultado da conexão de novas unidades à rede e aumentos de capacidade dos reatores existentes (IAEA, 2022a).

Atualmente é possível classificar o desenvolvimento dos reatores nucleares segundo suas gerações, são elas:

- **Reatores Nucleares da Geração I:** surgiram nos anos 1950 como protótipos experimentais e foram concebidos no período de transição do uso restrito da energia nuclear em projetos belicistas para o seu uso também em usinas para produção de eletricidade. Àquela época o mundo se defrontava com a continuidade de fortíssimas tensões geopolíticas surgidas durante a 2ª Grande Guerra Mundial e perpetuadas durante todo o período da “Guerra Fria”. De sorte que os reatores da Geração I, ou foram desenvolvidos a partir de projetos não pacíficos, ou tinham a finalidade híbrida de produção de eletricidade e fabricação de material para uso bélico (<http://www.aben.com.br/noticias/modelos-tecnologicos-de-reatores>). Nos dias atuais, todos os reatores da Geração I, construídos nas décadas 1950 e 1960 já foram descomissionados e retirados de operação. Alguns destes reatores são: Argone – EUA (1951), ligava 4 lâmpadas; Obninsk AM1 – URSS (1954), 6 MW de potência; e Shippingport – EUA (1957), 60 MW de potência (TRAVASSOS, 2015).
- **Reatores Nucleares da Geração II:** Atualmente o mundo conta com uma frota de mais de 440 usinas nucleares em operação em mais de 30 países. Todas elas utilizam reatores que pertencem à chamada Geração II e incorporam toda a evolução tecnológica e a experiência acumulada pelo setor desde a época de construção dos primeiros reatores da Geração I. Dessas usinas da Geração II (Figura 1), hoje em operação, mais de 80% utilizam reatores abastecidos com urânio levemente enriquecido e refrigerados com água leve, aproximadamente 10% fazem uso de reatores a urânio natural e refrigerados com água pesada e uma parcela menor usa como refrigerante algum tipo de gás. Essas últimas

podem utilizar como combustível, tanto urânio enriquecido quanto natural ou mesmo uma mistura de urânio com plutônio.

Figura 1 – Diagrama de uma central nuclear PWR Geração II



Fonte: Adaptado de U.S.NRC, 2013.

Hoje, todos os reatores da Geração II em operação, independentemente do tipo, modelo tecnológico, nacionalidade, combustível utilizado ou fabricante, incorporam uma série de modernizações, capazes de garantir um elevado padrão de segurança, ótimo controle da reatividade, alta produtividade representado por elevados fatores de disponibilidade e capacidade, eficientes sistemas de resfriamento do núcleo, boa capacidade de resistir a ataques terroristas e sistemas para garantir a não proliferação de materiais passíveis de uso na fabricação de artefatos bélicos. Esses reatores da Geração II são, ainda, equipados com dispositivos para impedir a liberação de material radioativo para o meio ambiente, na remota possibilidade de ocorrência de um acidente.

- **Reatores Nucleares da Geração III/III+:** Comparativamente às usinas de Geração II, as usinas de Gerações III apresentam diversas evoluções técnicas. A principal inovação é a utilização em maior escala de sistemas passivos de segurança, cujos mecanismos de atuação dependem tão somente de fenômenos físicos naturais como, por exemplo, a força da gravidade, a troca

térmica por convecção e a circulação natural de gases e líquidos. A grande vantagem de um sistema passivo em relação a um ativo tradicional (utilizado pelas usinas da Geração II) é que o sistema passivo entra automaticamente em operação no instante em que forem preenchidas as condições de seu projeto, bem como sua atuação independe da ação humana ou de equipamentos eletromecânicos.

Os projetos de reator Geração III+ são um desenvolvimento evolutivo de reatores Geração III, oferecendo melhorias significativas na segurança em relação à Geração III, isto é, de uma geração para outra geração. Além do uso de sistemas passivos, as usinas de Geração III+ apresentam diversas outras evoluções técnicas: queima mais eficiente do combustível, melhor eficiência térmica, projetos mais simplificados e mais racionais, vida útil mais longa, sistemas para contenção de radiação mais eficientes, menor quantidade de rejeitos gerados e menores quantidades de equipamentos eletromecânicos. Outra vantagem a destacar na Geração III+ é a utilização das mais modernas técnicas para os Sistemas Digitais de Instrumentação e Controle, enquanto a grande maioria das usinas de Geração II ainda faz uso de sistemas analógicos.

Em termos de implantação da usina, as da Geração II foram construídas com os métodos tradicionais de obras civis e de montagens eletromecânicas. Já o projeto de algumas usinas da Geração III+ permite que sejam construídas e montadas em módulos, ou seja, grandes blocos de construção civil e de equipamentos são pré-fabricados ou pré-montados em fábricas e posteriormente transportados para montagem final no canteiro de obras. O uso desse tipo de construção modular, indubitavelmente, traz grandes vantagens competitivas, pela melhor organização do canteiro de obras, maior facilidade no gerenciamento dos almoxarifados e redução do cronograma de implantação.

A primeira usina avançada da Geração III foi construída em Kashiwazaki no Japão e entrou em operação em 1996, equipada com um reator ABWR de 1700 MW Reator Avançado a Água Fervente. Na atualidade, diversos modelos de reatores avançados estão sendo construídos em diferentes países, como por exemplo: os reatores EPR-1650 MW que estão sendo implantados nas usinas Olkiluoto na Finlândia e Flamanville na França; os quatro reatores AP 1000 nas usinas norte-americanas Vogtle 3 e 4 e Summer 2 e 3; os reatores VVER - série V da

Rosenergoaton que estão sendo construídos na Rússia e em diversos países do Leste Europeu (IAEA, 2020; TRAVASSOS, 2014).

- **Reatores Nucleares da Geração IV:** Os sistemas de Geração IV, que compreendem os reatores e suas instalações associadas de ciclo de combustível, destinam-se a proporcionar avanços significativos em comparação com os atuais reatores avançados de água leve (*advanced light water reactors* – ALWRs), também chamados sistemas de Geração III, em termos de economia, segurança, desempenho ambiental e resistência à proliferação. Espera-se que os sistemas Generation-IV sejam desenvolvidos até o ponto de implantação comercial em pelo menos 2030 (Şahin; Şahin, 2021; Abram; Ion, 2008).

O desenvolvimento das tecnologias da Geração IV é coordenado pelo GIF (*Generation IV International Forum*), uma organização internacional fundada em 2001. Esta organização publica os documentos referenciais para as GEN IV NPPs (*Generation IV Nuclear Power Plants*): GIF (2002, 2009a, 2009b, 2012, 2014). As NPPs GEN IV devem se tornar, em muitos países, a importante fonte de energia de base no médio-longo prazo de duração (2030- 2050). Hoje em dia, existem muitos projetos dessas NPPs, mas por razões políticas, estratégicas e econômicas, apenas alguns deles serão implantados (IAEA, 2020a; Locatelli; Mancini; Todeschini, 2013; Şahin; Şahin, 2021).

2.2 SMALL MODULAR REACTORS

A energia nuclear pode desempenhar um papel muito significativo a longo prazo para atender às crescentes demandas de energia do mundo, como a de países em desenvolvimento, ampliando sua grade elétrica e atendendo locais remotos e de difícil acesso, ao mesmo tempo em que aborda os desafios associados ao impacto climático e ambiental global. Muitas nações do mundo estão ativamente envolvidas em uma grande expansão do seu complexo de energia nuclear. O grau em que a energia nuclear pode atender às necessidades energéticas, seja a nível mundial ou regional, será ditado pelo ritmo e adequação das soluções técnicas e políticas para

problemas de resíduos, segurança, segurança e não proliferação, bem como a capital custo de construção (Vujić *et al.*, 2012).

Dada a ameaça dos combustíveis fósseis na criação de uma alteração climática global e a necessidade de medidas drásticas de descarbonização, vários estudos recomendaram estratégias regionais e nacionais para alcançar a produção de energia eléctrica sem carbono. Várias empresas estão trabalhando em projetos geração III e geração III+ que são menores em escala do que os projetos atuais e, em vários casos, também fazem uso de técnicas de construção modular. Essa arquitetura de reator modular pequeno (SMR) é baseada em eficiências realizadas de aprendizado por meio da prática (Goldberg; Rosner, 2011; Michaelides; Michaelides, 2020; Nian; Zhong, 2020).

Os reatores modulares compactos são capazes de enfrentar com força um amplo espectro dos desafios inerentes ao setor nuclear. Correspondendo à tecnologia de geração III+, os SMRs representam uma vanguarda da tecnologia nuclear, sendo amplamente implementados na produção de energia eléctrica e funcionando como substitutos ou complementos aos reatores de geração II.

Este tipo de reator ostenta um design modular mais simples, imponente e com alto grau de segurança. Por serem fabricados em instalações industriais, os SMRs exigem um menor investimento de capital inicial, além de apresentarem um tempo de construção reduzido. Graças ao seu tamanho compacto, os SMRs podem ser transportáveis, permitindo o uso em áreas remotas, desprovidas de infraestrutura avançada ou rede eléctrica. Além disso, eles podem ser agrupados em um único local, criando uma usina de energia multimódulo de alta capacidade (Vujić *et al.*, 2012).

O termo "**Modular**" refere-se ao sistema em que o conjunto da unidade pode ser montada a partir de um ou vários sub-módulos, conforme a potência desejada. A implantação dos módulos pode ser sequenciada ao longo do tempo, permitindo combinar crescimento da carga regional e as despesas de capital ao longo de um intervalo de tempo prescrito. A montagem de elementos ou módulos embutidos de fábrica é a técnica de construção modular. Embora seja uma parte integrante da estratégia de construção para os SMRs, esta técnica é empregada para elementos de construção relevantes das centrais nucleares de todas as potências (Carelli; Ingersoll, 2015).

Os SMRs se situam na faixa de potência variando de 10 MW(e) a 300 MW(e) e são desenvolvidos por diversos países, existindo inúmeros modelos. Normalmente,

eles são construídos em uma fábrica e transportados para o local de utilização, são indicados para áreas isoladas nas quais não existem linhas de transmissão à longa distância, abastecimento de pequenas cidades, geração de calor para processos industriais ou locais onde há deficiência da mão de obra qualificada para a construção de uma planta nuclear. Dependendo do uso apropriado, esses pequenos reatores apresentam inúmeras vantagens em relação a instalações de maior potência: menor investimento para a construção, projetos mais simples, menor tempo de construção, maior flexibilidade operacional podendo variar rapidamente a potência de operação, segurança reforçada e elevado percentual de sistemas que utilizam segurança passiva. Alguns modelos são projetados para operar por longos períodos sem abastecimento. A grande maioria dos SMRs utiliza os conceitos de um reator PWR - à água leve pressurizada, porém há alguns modelos a água leve fervente - BWR, reatores de nêutrons rápidos e reatores de alta temperatura refrigerados a grafite. Alguns tipos são refrigerados a metal líquido, hélio ou sal líquido (Travassos, 2014).

Atualmente, existem mais de oitenta (80) projetos de SMRs em desenvolvimento e implementação em diferentes estágios. Vários marcos importantes foram alcançados na implementação da tecnologia SMR. Na Tabela 1, são apresentados os SMRs oferecidos pela indústria nuclear. A unidade de energia flutuante Akademik Lomonosov na Federação Russa, com dois módulos KLT-40S, foi conectada à rede em dezembro de 2019 e iniciou a operação comercial em maio de 2020. O reator demonstrativo HTR-PM na China foi conectado à rede em dezembro de 2021 e atingiu a potência total inicial em dezembro de 2022(WNN, 2022). O CAREM25 na Argentina está em construção e espera-se que atinja a primeira criticidade em 2026. A construção do ACP100 na China começou em julho de 2021 e tem como objetivo iniciar a operação comercial até o final de 2026. Entre outros que estão em construção ou prestes a entrar em operação (IAEA, 2022b).

A Tabela 1 lista todos os principais projetos em desenvolvimento de reatores SMR refrigerados a água, juntamente com a capacidade de produção, tipo de reator, organização projetista (fornecedor), país de origem e estado de desenvolvimento ou implantação.

Tabela 1 – Projeto e status dos principais SMRs refrigerado por água em desenvolvimento

PAPEL I.1: REATORES MODULARES PEQUENOS RESFRIADOS POR ÁGUA (BASE TERRESTRE)					
PROJETO	POTÊNCIA MW(E)	TIPO	FORNECEDOR	PAÍS	STATUS
CAREM	30	Integral PWR	CNEA	Argentina	Em construção
ACP100	125	Integral PWR	CNNC/NPIC	China	Em construção
CANDU SMRTM	300	PHWR	Candu Energy Inc.	Canadá	Projeto Conceitual
CAP200	> 200	PWR	SPIC/SNERDI	China	Projeto Básico
DHR400	400 MW(t)	PWR (pool type)	CNNC	China	Projeto Básico
HAPPY200	200 MW(t)	PWR	SPIC	China	Detalhamento de Projeto
NHR200-II	200 MW(t)	Integral PWR	Tsinghua University and CGN	China	Projeto Básico
TEPLATORTM	< 150 W(t)	HWR	UWB Pilsen & CIIRC CTU	República Tcheca	Projeto Conceitual
NUWARDTM	2 x 170	Integral PWR	EDF	França	Projeto Conceitual
IMR	350	PWR	MHI	Japão	Projeto Conceitual Completed
i-SMR	170	Integral PWR	KHNP and KAERI	República de Coreia	Projeto Conceitual
SMART	107	Integral PWR	KAERI and K.A.CARE	República de Coreia e Arábia Saudita	Detalhamento de Projeto
RITM-200N	55	Integral PWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	Federação Russa	Detalhamento de Projeto Completo
VK-300	250	BWR	NIKIET	Federação Russa	Detalhamento de Projeto
KARAT-45	45 – 50	BWR	NIKIET	Federação Russa	Projeto Conceitual
KARAT-100	100	BWR	NIKIET	Federação Russa	Projeto Conceitual
RUTA-70	70 MW(t)	PWR (pool type)	NIKIET	Federação Russa	Projeto Conceitual
STAR	10	LWR (pressure tube)	STAR ENERGY SA	Suíça	Projeto Básico
Rolls-Royce SMR	470	PWR	Rolls-Royce SMR Ltd.	Reino Unido	Detalhamento de Projeto
VOYGRM	4/6/12 x 77	Integral PWR	NuScale Power Corporation	EUA	Fabricação de equipamentos em progresso

(CONTINUAÇÃO) Tabela 1 – Projeto e status dos principais SMRs refrigerado por água em desenvolvimento					
BWRX-300	270 – 290	BWR	GE-Hitachi Nuclear Energy and Hitachi- GE Nuclear Energy	EUA e Japão	Detalhamento de Projeto
SMR-160	160	PWR	Holtec International	EUA	Projeto Preliminar Concluído
Westinghouse SMR	> 225	Integral PWR	Westinghouse Electric Company LLC	EUA	Projeto Conceitual Completado
mPower	2 x 195	Integral PWR	BWX Technologies, Inc	EUA	Projeto Conceitual
OPEN20	22	PWR	Last Energy Inc.	EUA	Detalhamento de Projeto
PARTE I.2: REATORES MODULARES PEQUENOS RESFRIADOS POR ÁGUA (BASE MARINHA)					
PROJETO	POTÊNCIA MW(E)	TIPO	FORNECEDOR	PAÍS	STATUS
KLT-40S	2 x 35	PWR	JSC Afrikantov OKBM	Federação Russa	Em Operação
ACPR50S	50	PWR (loop type)	CGNPC	China	Detalhamento de Projeto
ACP100S	125	Integral PWR	CNNC/NPIC	China	Projeto Básico
BANDI-60	60	PWR	KEPCO E&C	República da Coreia	Projeto Conceitual
ABV-6E	6 – 9	PWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	Federação Russa	Projeto Final
RITM-200M	50	Integral PWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	Federação Russa	Projeto Básico completo
VBER-300	325	Integral PWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	Federação Russa	Estágio de Licenciamento
SHELF-M	up to 10	Integral PWR	NIKIET	Federação Russa	Projeto Básico

Fonte: IAEA, 2022.

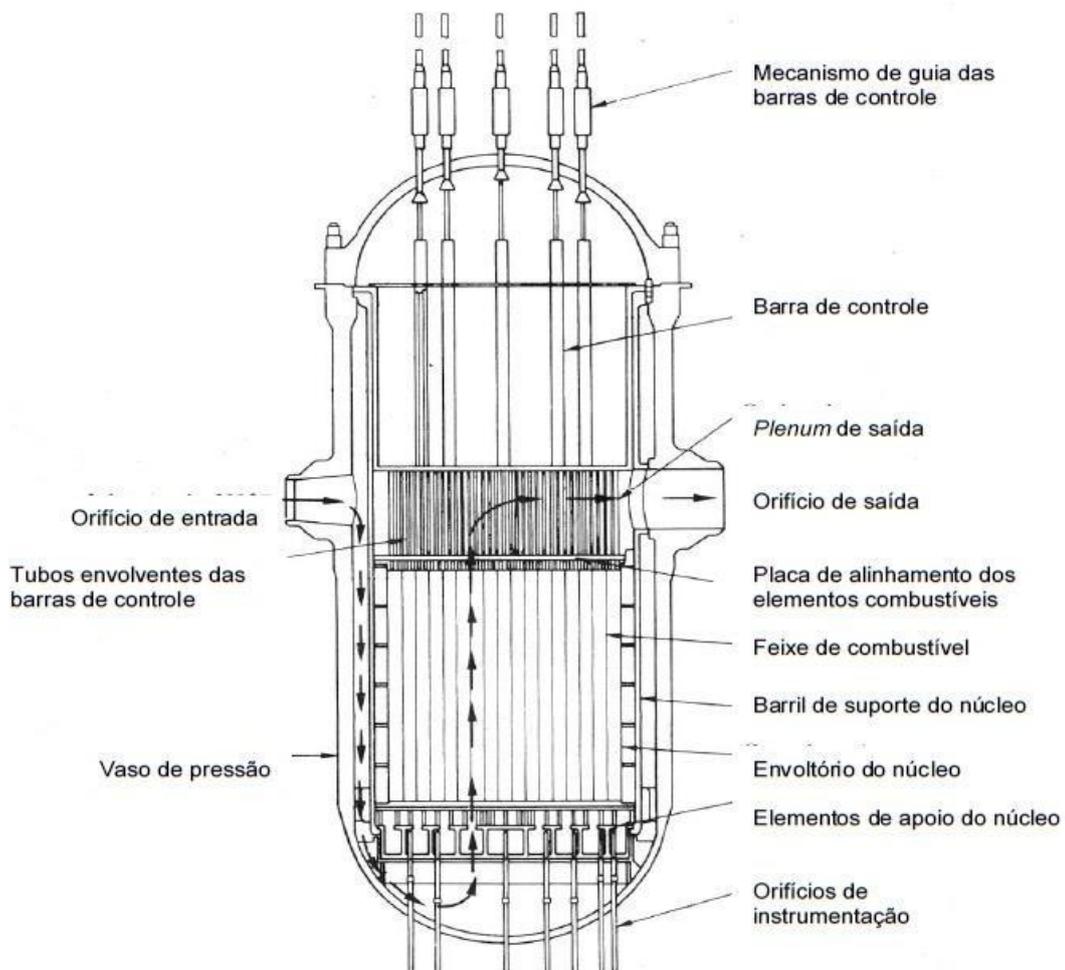
Além dos citados acima, Locatelli *et al.* (2015), destacam as seguintes vantagens dos reatores SMRs: (i) sua pequena dimensão os tornam adequados para pequenas redes elétricas, sendo uma boa opção para locais que não podem acomodar plantas em larga escala; (ii) o processo de construção modular torná-los-ia mais acessíveis, reduzindo os custos de capital e períodos de construção; (iii) seu tamanho também aumentaria a flexibilidade por serviços públicos, uma vez que poderia adicionar unidades como mudanças na demanda, ou utilizá-los para a substituição no local de envelhecimento plantas de combustíveis fósseis; e (iv) alguns dos projetos para SMRs usam pouca ou nenhuma água para o resfriamento, o que reduziria seu impacto ambiental.

2.3 REATORES A ÁGUA PRESSURIZADA (PWR)

Dentre os reatores nucleares, os que são refrigerados e moderados por água leve somam 82% dos que estão em funcionamento no mundo segundo a IAEA - Nuclear Technology Review 2017. Dentre estes, Travassos (2015) afirma que mais de 60% são PWR, ou seja, Reatores a Água Pressurizada.

O reator PWR utiliza a água leve como refrigerante, moderador e refletor. Como indicado na figura 2 e figura 3, a água entra no vaso de pressão, pela perna fria, a uma temperatura de 290°C, flui ao redor do núcleo do reator para parte de baixo, onde serve com um refletor de nêutrons. Após isto, passa para parte de cima através do núcleo do reator, onde é aquecida, e sai do vaso de pressão, pela perna quente, com uma temperatura em torno de 325°C.

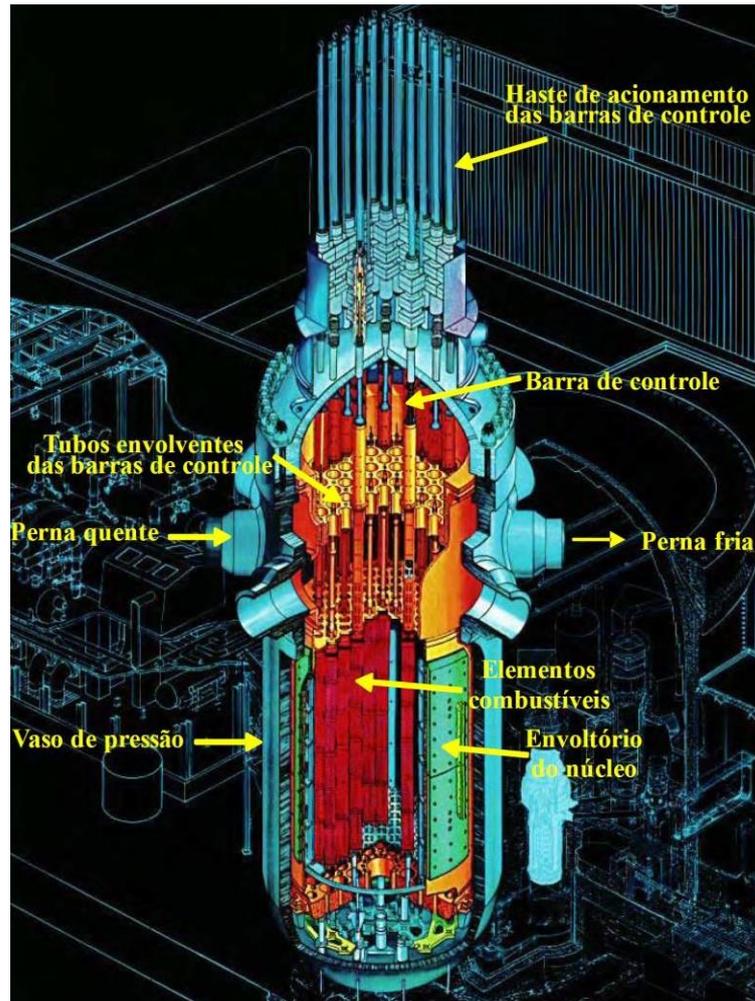
Figura 2 – Vaso de pressão de um reator nuclear



Fonte: Lamarsh, Baratta, 2001.

A característica principal de uma unidade do tipo PWR é que a água de refrigeração pressurizada praticamente se mantém na fase líquida, uma vez que a pressão é mantida a aproximadamente 15MPa. A esta pressão a água não irá ferver muito. Partindo desse princípio, o vapor para as turbinas é produzido externamente ao reator (Lamarsh; Baratta, 2001).

Figura 3 – Corte do vaso de pressão em perspectiva

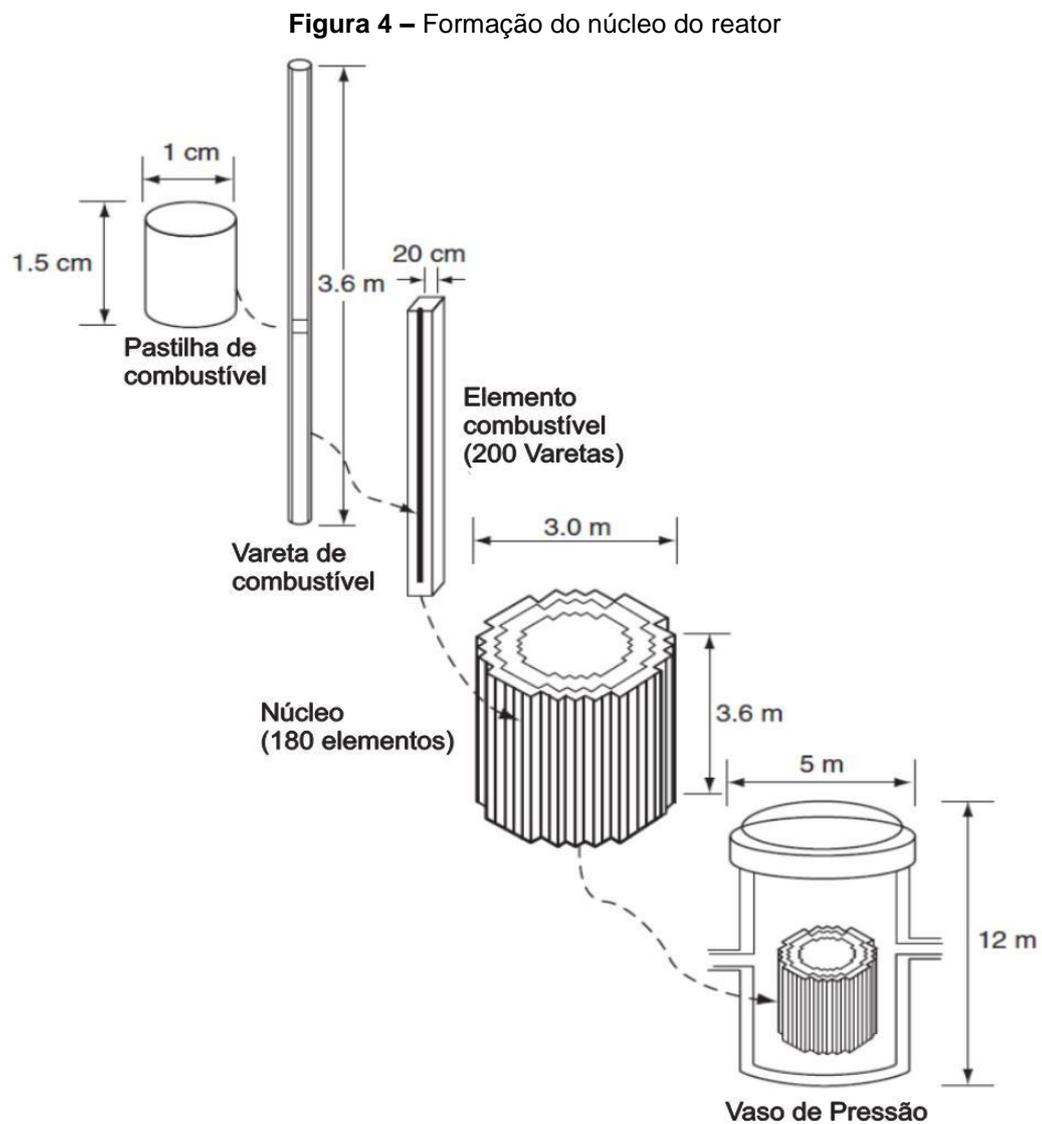


Fonte: Whestinghouse, 2003.

Geralmente o material utilizado como combustível em PWRs é o dióxido de urânio (UO_2) levemente enriquecido, de 2 a 5 % de ^{235}U (Lewis, 2008). O UO_2 , material cerâmico com ponto de fusão de aproximadamente 2800°C , é utilizado na forma de pastilhas cilíndricas, com 1 cm de diâmetro e até 2 cm de altura. Quando estão na temperatura de operação, as pastilhas se expandem e preenchem os espaços vazios deixados entre elas, resultando em uma haste de combustível solidamente embalada. As pastilhas de UO_2 são acondicionadas em tubos de aço

inoxidável ou de zircaloy. Além de funcionar como um suporte para o material combustível, os tubos de zircaloy previnem o escape dos produtos de fissão para o refrigerante, especialmente produtos de fissão gasosos, que são liberados das barras durante a operação do reator (Lamarsh; Baratta, 2001).

Aproximadamente 200 barras de combustível são agrupadas em um feixe chamado de elemento combustível de aproximadamente 20 cm de lado. Cerca de 180 elementos são montados em uma matriz cilíndrica, para formar o núcleo do reator. Essa estrutura é montada em um suporte em um vaso de pressão feito de aço com diâmetro externo de aproximadamente 5 m, altura de 12 m, e paredes com até 30 cm de espessura (Figura 4). (Murray, 2009).



Fonte: Murray e Holbert, 2015.

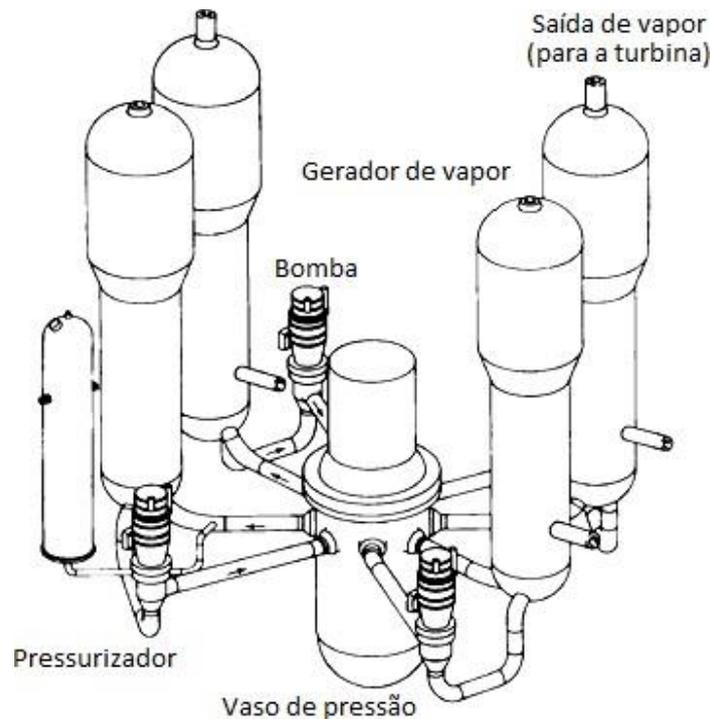
O Sistema de Refrigeração do Reator PWR é, praticamente, todo contido no interior do envoltório de contenção e é composto de dois sistemas (Figura 1) que contém uma perna fria, uma perna quente, um gerador de vapor e uma bomba de refrigeração do reator. Um dos sistemas tem, ainda, o pressurizador ligado a ele através de uma linha de surto. O pressurizador, por sua vez, é ligado ao tanque de alívio através das linhas de descarga das suas válvulas de alívio e de segurança (Murray; Holbert, 2015).

Durante operação normal, o refrigerante do reator que remove o calor gerado pelo núcleo, funcionando também como moderador, reduzindo a energia dos nêutrons que vão produzir as fissões nos elementos combustíveis e gerar energia. Além disso, ele também funciona como um refletor de nêutrons, reduzindo a fuga dos mesmos do interior do vaso do reator e, ainda, serve como meio solvente do ácido bórico que é usado para auxiliar no controle da geração de potência no núcleo, uma vez que ele absorve nêutrons e, com isso, pode ser utilizado para controlar as reações de fissões.

No interior do vaso do reator, os elementos combustíveis aquecem o refrigerante, que permanece sub-resfriado (temperatura abaixo do ponto de saturação para a pressão existente), na sequência é levado até os geradores de vapor onde irá transferir calor, através dos tubos, para a água de alimentação que está no interior dos geradores de vapor (o lado secundário dos geradores de vapor trabalha saturado), transformando-a em vapor para ser utilizado na turbina (Bezerra *et al.*, 2012).

A Figura 5 representa esquematicamente um reator PWR e como ficam dispostos os geradores de vapor, vaso de pressão, pressurizador e bombas. Frequentemente um PWR pode possuir de dois a quatro sistemas primários ligados a um sistema secundário. Na Figura 5, há quatro bombas de refrigeração, uma para cada ciclo de refrigeração, mas apenas um pressurizador, responsável pela manutenção da pressão, para todo sistema. Os geradores de vapor são posicionados acima do vaso de pressão que está posicionado na região central inferior. Tal disposição permite a circulação do refrigerante por convecção natural em casos de perda de circulação forçada, também na ocorrência do Acidente de Perda de Refrigerante (*Loss Of Coolant Accidents - LOCA*).

Figura 5 – Reator PWR com quatro sistemas primários



Fonte: Lamarsh e Baratta, 2001.

2.3.1 Pressurizador de um reator PWR

Um pressurizador, representado na Figura 6, consiste em um reservatório, geralmente constituído de uma liga de aço e carbono e revestido com aço inoxidável, munido de um orifício de spray, aquecedores elétricos e válvulas de alívio de pressão (Lamarsh; Baratta, 2001).

O pressurizador é uma câmara bifásica, onde a fase vapor ocupa a parte superior, enquanto que a fase líquida ocupa a parte inferior. Como o pressurizador é conectado à parte quente do sistema primário por meio de um conduto de compensação, chamado de linha de surto, o pressurizador pode então desempenhar uma de suas funções que é a de amortecer variações de volume do refrigerante no circuito primário.

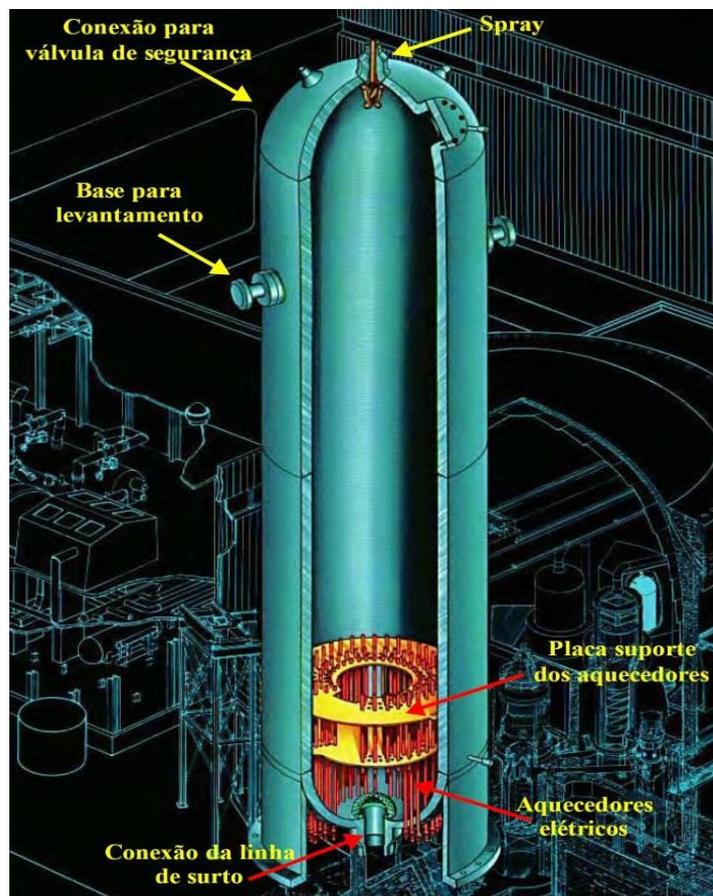
Quando a temperatura média aumenta, o fluido se expande e penetra no pressurizador pela linha de surto (*insurge*), sendo o aumento de pressão ali absorvido pela condensação espontânea, nas paredes do pressurizador, e condensação nas gotículas do borrifo de água retirada da perna fria. Isso faz com que a pressão não mais aumente, permanecendo dentro de um limite superior aceitável. Caso o circuito primário fosse um sistema hermeticamente fechado, pressões intensas se

desenvolveriam em todos os componentes deste circuito, colocando em risco a sua integridade.

Entretanto, se o transitório for severo, outros dispositivos do pressurizador como válvulas de segurança e alívio são acionados. Além disso, outras medidas podem ser tomadas como o aumento da concentração de boro, acionamento das barras de controle e, em última instância, desligamento do reator. O conjunto dessas medidas garante a necessária despressurização do sistema (Bruel, 1997).

No sentido oposto, uma diminuição da temperatura média do refrigerante conduz a uma contração de volume da água do primário, provocando a saída de água do pressurizador pela linha de surto (*outsurge*) com a conseqüente redução da pressão do primário, provocando alterações nas condições de transferência de calor do núcleo do reator para o refrigerante. Portanto, um limite inferior de pressão deve ser observado. Isso é conseguido no pressurizador pelo acionamento de aquecedores elétricos que produzem mais vapor, até que a pressão para de decrescer

Figura 6 – Pressurizador



Fonte: Whestinghouse, 2003.

Para Woiski (1981) e Bruel (1997), dois tipos de transitórios podem ser observados em um reator: transitórios decorrentes de variações de cargas e aqueles oriundos de acidentes ou condições anormais. Tendo em vista o grande papel desempenhado por um pressurizador, no que tange ao funcionamento de um reator de potência, muitos pesquisadores ligados à área desenvolveram vários modelos para simular o comportamento dinâmico desse componente e assim desencadearam-se muitas pesquisas inerentes a este assunto.

Para estes autores, Woiski (1981) e Bruel (1997), qualquer modelo teórico de um pressurizador toma como base a análise de seu comportamento dinâmico. Para tanto, divide-se o pressurizador em regiões chamadas de volumes de controle. O número de regiões e suas características físicas dependem do modelo estabelecido.

Uma abordagem de modelagem inicial tratou todo o pressurizador como uma única região de mistura homogênea de líquido e vapor que está em equilíbrio térmico e hidrodinâmico (Brown, 1957; Christy; Galan, 1973; Gajewski, 1955). Este modelo de equilíbrio simplista assume que as fases, líquida e vapor estão sempre na condição de saturação correspondente à pressão do sistema. Foram obtidas as soluções das equações acopladas de conservação de massa e energia para as fases líquida e vapor. Devido à simplicidade das equações governantes, a solução é bastante rápida, mas os resultados são limitados, uma vez que este modelo não leva em conta muitos dos processos físicos que ocorrem no pressurizador. Para superar esta limitação, vários modelos de não equilíbrio foram propostos para calcular a pressão e o nível de água no pressurizador durante o estado estacionário e após transientes de operação (Nahavandi; Makkenchery, 1970).

Os modelos que dividem o volume do pressurizador em múltiplas regiões distintas são classificados como modelos de duas regiões, três regiões e multirregiões. Eles resolvem as equações acopladas de conservação de massa e energia nas diversas regiões, sujeitas a suposições específicas, para calcular a pressão e o nível de água no pressurizador. Por exemplo, as fases, líquida e vapor em várias regiões do pressurizador poderiam estar em diferentes estados termodinâmicos (Zhong *et al.*, 2019). Nahavandi *et al.* (1967) mostraram que os modelos de não equilíbrio são muito mais realistas do que os modelos de equilíbrio para muitos cenários de operação.

Em um PWR a previsão da pressão durante vários transientes é essencial para operar um reator de forma segura, pois permite decidir quais ações devem ser

tomadas para controlar ou reduzir as consequências de um acidente. Essa previsão é obtida através de códigos computacionais baseados em modelos físicos de todos os componentes do circuito.

Para estudar os transientes no pressurizador de PWRs, são realizados experimentos que simulam uma série, de fenômenos físicos. A análise do comportamento dinâmico apoia-se, fundamentalmente, nas equações de balanço de massa e energia entre os volumes de controle. O balanço de energia está ligado à 1ª lei da termodinâmica e a análise do modelo deve considerar:

1. Parâmetros geométricos, volume inicial de vapor, volume inicial do líquido.
2. Mecanismo de liquefação do vapor por condensação.
3. Condensação nas gotas do aspersor (*spray*).
4. Transferência de calor entre a interface vapor-água.
5. Transferência de calor por condensação com as paredes do pressurizador.
6. Transferência de calor por ebulição com as paredes do pressurizador.
7. Transferência de calor entre o vapor e a parede por circulação natural.
8. Transferência de calor entre o líquido e a parede por circulação natural.
9. Transferência de calor através das paredes do pressurizador.
10. *Flashing* no seio do líquido num *outsurge* rápido.
11. Taxas de ebulição e condensação da água.
12. Transferência de calor gerada pelos aquecedores.
13. Gases não condensáveis e eliminação de gases.
14. Abertura e fechamento das válvulas de segurança e alívio.

Incorporar todos estes fenômenos dentro de um modelo levaria a grandes complicações e, por esta razão, muitas vezes algumas hipóteses simplificadoras são consideradas.

Uma versão do modelo de duas regiões divide o pressurizador em uma região superior de vapor e uma região inferior de líquido, com uma interface fixa e contabiliza os processos de mudança de fase (condensação e evaporação) durante um evento transitório (Redfield; Prescop; Margolis, 1968). Cada região contém inicialmente uma quantidade especificada de fluido e pode trocar energia com o ambiente adjacente. Este modelo resolve as equações acopladas de conservação de massa e energia em estado quase estacionário nas duas regiões. Durante uma saída abrupta de líquido,

assume-se que a evaporação (*flashing*) ocorre na interface líquido-vapor e não pelo surgimento de bolhas no volume do líquido.

Uma outra versão dos modelos de duas regiões em desequilíbrio permite a troca de massa na interface entre as regiões de vapor e líquido, além da perda de energia para o ambiente externo. A região inferior contém água sub-resfriada ou saturada, enquanto a região superior contém vapor superaquecido ou saturado (Abdallah *et al.*, 1982). Ambos os modelos, de Redfield *et al.* (1968), e, Abdallah *et al.* (1982), desconsideram a condensação na parede e assumem que o líquido que entra abruptamente se mistura completamente com o que já se encontra na região líquida do pressurizador, desconsiderando assim a possibilidade de formação de camadas do líquido.

Para contabilizar a diferenciação de camadas na região de água durante um *insurge* (surto de entrada), No e Baek (1968) propuseram um modelo de pressurizador de três regiões em desequilíbrio termodinâmico. Além da região de vapor superior, a região líquida inferior é dividida em duas sub-regiões: uma de água saturada e outra de água de surto ou sub-resfriada. Dessa forma, a água que entra no pressurizador durante um *insurge* permanece na região de água de surto e não se mistura com a região de água saturada. Durante um *outsurge* (surto de saída), a água flui para fora da região de surto do pressurizador para o ramal quente, sem afetar a massa da região de água saturada no pressurizador. As equações de conservação de massa e energia resolvidas para esse modelo não se aplicam quando um *outsurge* continua além do esgotamento do líquido sub-resfriado na região de surto do pressurizador.

Todavia, o fluxo de massa e calor que cruzam as fronteiras dos volumes de controle têm sido os pontos críticos de cada análise. A literatura referente ao assunto mostra a quase unanimidade dos autores a respeito do uso de dois tipos de modelos (Bruehl, 1997):

- **Modelo de equilíbrio termodinâmico:** As equações fundamentais são aplicadas a um único volume de controle representado pela fase líquida e vapor. Neste modelo, o líquido pressurizado e o vapor são tratados como uma mistura saturada à mesma temperatura.
- **Modelo de não-equilíbrio termodinâmico:** Este modelo foi utilizado pela maioria dos autores. As equações de conservação de massa e energia são aplicadas para as fases de vapor e de líquido separadamente, considerando

volumes e temperaturas distintas para cada uma das fases. Foi comprovado que este modelo era mais realista que o modelo saturado em todos os instantes (Nahavandi; Chiabrandy; Amidon, 1967).

2.4 REATORES PWR DE CONFIGURAÇÃO INTEGRAL

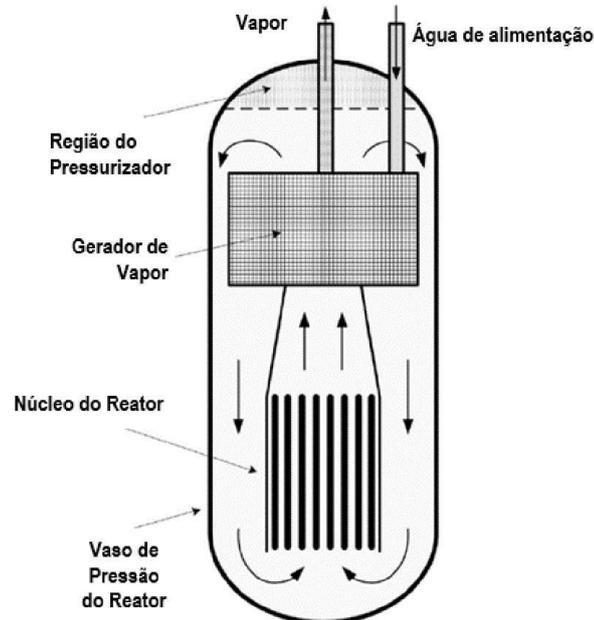
O desenvolvimento dos SMRs tem ganhado atenção global por diversas razões. Diferentemente dos reatores de grande escala que dominaram o cenário da energia nuclear, os SMRs são projetados e fabricados em instalações especializadas e podem ser transportados até o local de instalação. Esta abordagem modular permite maior flexibilidade na composição dos blocos de energia, que podem incluir múltiplas unidades. Além da simplicidade e segurança aprimoradas, eles oferecem aplicações versáteis, como o fornecimento de calor para aquecimento urbano e processos de dessalinização. Estes projetos variam em sua potência, tamanho físico, tipo de combustível, a frequência de reabastecimento, e estado de desenvolvimento (Glaser *et al.*, 2015).

Muitos desses reatores têm uma potência de saída em torno de 300 MWe e utilizam uma configuração específica conhecida como iPWR (*Integrated Pressurized Water Reactors*) ou, em tradução livre, Reator de Água Pressurizada Integral. Um iPWR procura posicionar todo o sistema refrigerante do reator dentro dos limites do vaso de pressão do reator (VPR), conforme mostrado na Figura 7. Estes VPRs são altos e geralmente localizam o núcleo na parte inferior e os geradores de vapor perto do topo para configurar uma capacidade de resfriamento da circulação natural. A circulação natural pode ser feita usando o efeito da chaminé, em que o aquecimento do reator reduz a densidade do refrigerante de modo que ele sobe, e então, uma vez que o calor é removido no gerador de vapor, a densidade aumentada faz com que o refrigerante gravite até a entrada do núcleo. A cúpula superior do VPR serve como pressurizador (Murray; Holbert, 2015).

Como foi visto na Figura 5 o vaso de pressão de um PWR é formado basicamente o núcleo do reator. Já um iPWR não comporta apenas o combustível nuclear e as barras de controle, mas também os outros componentes do sistema de refrigeração como as bombas, gerador de vapor, pressurizador, mecanismo de controle de acionamento das hastes e o refletor de nêutrons. O vaso com a configuração integral é maior que os vasos de pressão de um PWR convencional, mas

o tamanho do edifício de contenção é uma fração do tamanho dos reatores do tipo laço correspondentes (Carelli *et al.*, 2004)

Figura 7 – SMR na configuração iPWR



Fonte: Murray e Holbert, 2015

O *International Reactor Innovative and Secure* (IRIS), ilustrado na Figura 8, é um exemplo na fronteira do desenvolvimento tecnológico na indústria nuclear, representando um reator da geração III+. Este modelo inovador se caracteriza como um reator modular, em que cada unidade opera de forma autônoma, oferecendo flexibilidade operacional e potencial para economia em escala. O IRIS utiliza água leve pressurizada como meio refrigerante, uma característica intrínseca à sua operação e eficiência. Além disso, ele é projetado com uma configuração integral, ou seja, todos os principais componentes do núcleo do reator estão localizados dentro do mesmo vaso de pressão. Apesar de sua potência ser um pouco mais elevada, atingindo 335 MW(e), o IRIS é classificado como um SMR (*Small Modular Reactor*) de acordo com a definição estabelecida pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2020b).

A trajetória de desenvolvimento da IRIS foi um empreendimento internacional notável, cujo início remonta ao ano de 1990, passando pelos seguintes marcos de desenvolvimento: conclusão do projeto conceitual e início do projeto preliminar – 2001, atividades do processo de pré-licenciamento – 2002 e Construção de instalações de

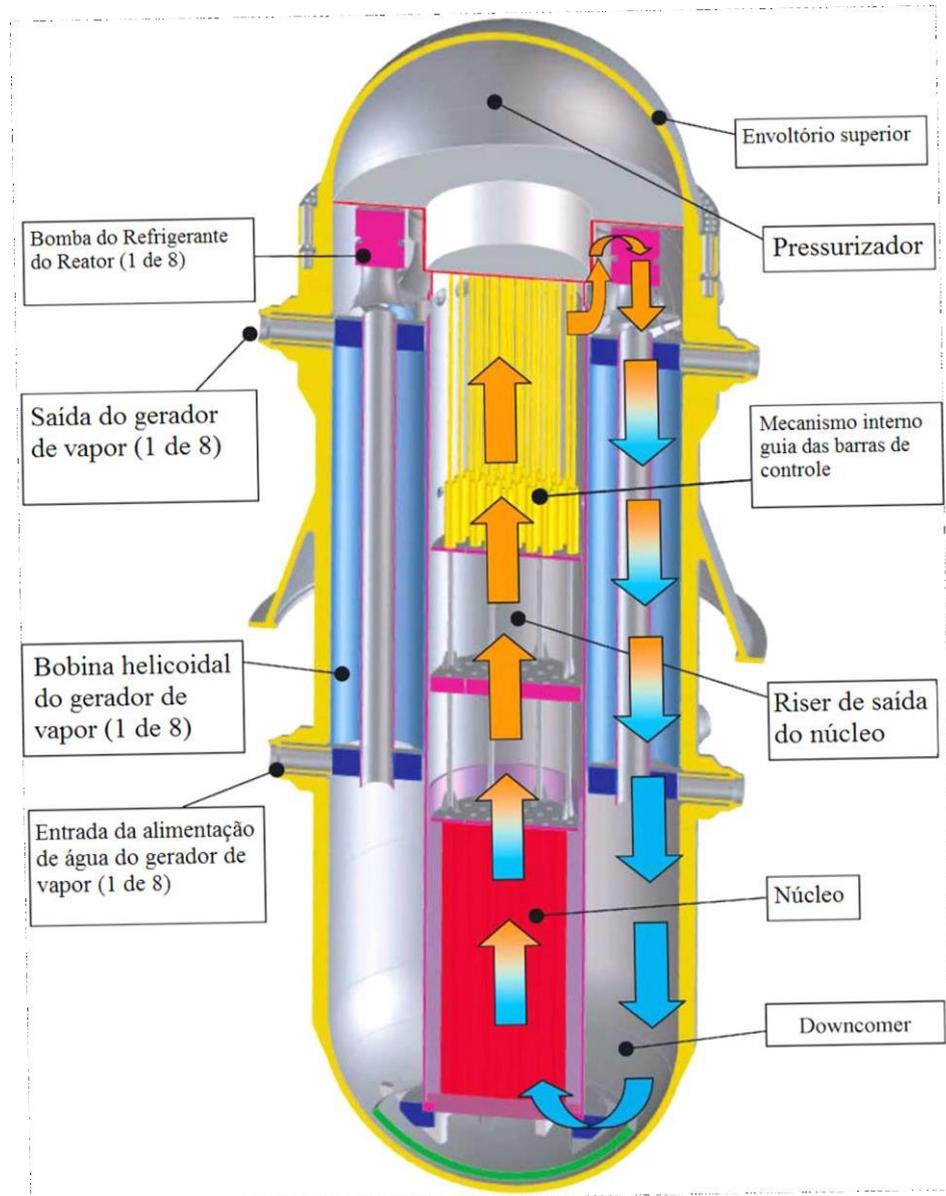
testes integrais – 2009. Este projeto foi controlado e finalizado sob a tutela da renomada *Westinghouse Electric Company*, um pioneiro e líder na indústria nuclear global. A equipe do IRIS concluiu o projeto da instalação de testes em grande escala para se preparar para a futura certificação do projeto. Estão em curso atividades de investigação e desenvolvimento (I&D) no campo da economia de projeto, do risco financeiro e da competitividade do SMR (IAEA, 2022). Entretanto, a magnitude e complexidade desse empreendimento marca a formação de um consórcio robusto, que conta com a colaboração de aproximadamente dezenove organizações distribuídas entre dez países. Essa abordagem colaborativa e internacional é uma prova do reconhecimento global da importância e fortalecimento do desenvolvimento de tecnologias seguras e eficientes para a geração de energia nuclear (Bezerra *et al.*, 2012; Carelli *et al.*, 2004; Khatry; Aydogan, 2017).

As contribuições dadas pelos membros do consórcio eram através do fornecimento de tecnologia e de dados experimentais, possibilitando o acúmulo de informações significantes ao desenvolvimento desse projeto. O Brasil fez parte de consórcio em três setores: indústria, laboratório e produção de energia.

Na indústria, a empresa envolvida foi a NUCLEP (*Nuclebrás Equipamentos Pesados S/A*), responsável pela contenção. Para análise de segurança e transientes, pressurizador e dessalinizado, o laboratório Brasileiro envolvido foi da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Para a produção de energia, estava a Eletronuclear, desenvolvendo perspectivas utilitárias. Como fruto dessa parceria, até os dias atuais, são feitas pesquisas que contribuem para a consolidação de reatores com a configuração integral (Nascimento, 2016).

Como um SMR que é um projeto derivado de um reator de água pressurizada (PWR), o IRIS, Figura 8, tem no pleno inferior, o núcleo, no pleno superior, o pressurizador, 8 bombas de refrigerante do reator do tipo bobina, 8 geradores de vapor de bobinas helicoidais, o *downcomer* e o vaso do reator. O vaso do reator tem as dimensões de 6,20 m (diâmetro interno) e 23,52 m (altura total) (Carelli *et al.*, 2004).

Figura 8 – Layout do reator IRIS



Fonte: Carelli *et al.*, 2004.

O núcleo do reator e o design do combustível da IRIS utilizam 264 hastes de combustível posicionadas em uma matriz quadrada de 17 x 17. O quadrado central é para instrumentação no núcleo, enquanto os restantes 24 quadrados são para hastes de guia. No total, existem 89 conjuntos de combustível que formam um núcleo com uma altura de combustível ativo de 4.267 m. Como outros reatores de água leve (LWRS), o combustível é UO₂ com um enriquecimento de 4,95% (CARELLI *et al.*, 2004). A Tabela 2 resume os principais parâmetros do projeto IRIS.

Tabela 2 – Principais parâmetros do projeto IRIS

PARÂMETROS	QUANTIDADE/DETALHES
Potência do reator	1000 MW (335 MWe)
Temperatura de entrada do núcleo do reator	292 °C
Temperatura de saída do núcleo do reator	330 °C
Circulação do refrigerante do reator	Forçado
Enriquecimento máximo de combustível	~5%
Frequência de reabastecimento	3,5 anos
Mecanismos de acionamento da haste de controle	Externo
Modo de controle de reatividade	Haste de controle, Ácido bórico (H3BO3)
Pressão de operação do refrigerante do reator	15.513 Mpa
Número de bombas de refrigerante do reator	8
Número de geradores de vapor	8
Tipo de sistemas de segurança	Passivo

Fonte: Khatry e Aydogan, 2017.

O projeto do IRIS foi focado principalmente em alcançar características de segurança inovadoras. A primeira linha de defesa no IRIS é eliminar os princípios de eventos que poderiam potencialmente causar danos ao núcleo. No IRIS, este conceito é implementado através da abordagem *safety-by-design*, que pode ser simplesmente descrita como “seguro pelo projeto”, isto é, se não for possível eliminar certos acidentes, o projeto reduzirá inerentemente suas consequências e/ou diminuirá sua probabilidade de ocorrência. A principal diferença entre o “*safety-by-design*” do IRIS e a abordagem da prática utilizada nos reatores convencionais é que o projeto do reator integrado é propício para eliminar os grandes acidentes com perda de refrigerante, visto que não há grandes penetrações primárias no recipiente do reator ou grandes laços, apenas o mais facilmente visível das características potenciais de segurança de reatores integrados. Embora as estratégias para melhorar a segurança dos reatores tenham evoluído ao longo dos anos, o foco continua sendo a seleção cuidadosa de características de design que minimizem ou eliminem eventos que possam levar a acidentes (Carelli *et al.*, 2004). As informações mais recentemente apontam que o projeto IRIS ainda está em fase de investigação e desenvolvimento, focando não apenas em questões de segurança, mas também em aspectos econômicos e de risco financeiro (IAEA, 2022).

2.4.1 Pressurizador do iPWR

O pressurizador do IRIS está integrado à parte superior do vaso do reator. A região do pressurizador é definida por uma estrutura compacta, em formato de chapéu

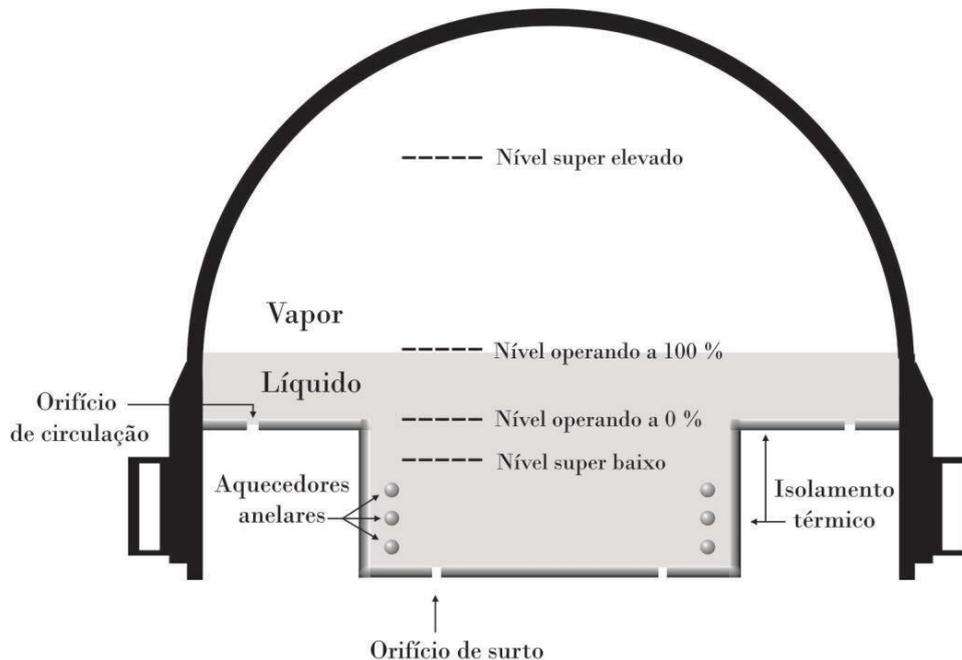
de topo invertido, que divide o caminho de fluxo do líquido de trânsito do reator da água pressurizada saturada. Esta estrutura inclui um isolamento de célula fechada para minimizar a transferência de calor entre o fluido do pressurizador mais quente e a água primária sub-resfriada. Hastes de aquecimento anulares estão localizadas na parte inferior do chapéu de topo invertido, que contém orifícios para permitir a entrada e saída de água na região do pressurizador. Esses orifícios para movimentação do fluido estão localizados logo abaixo das hastes de aquecimento, de modo que o fluido que entra flui para cima ao longo dos elementos de aquecimento. Ao utilizar a região da cabeça superior do vaso do reator, o pressurizador do IRIS fornece um volume muito grande de água e vapor, em comparação com plantas que possuem um vaso de pressurizador tradicional e separado (CARELLI *et al.*, 2004; IAEA, 2020b; KHATRY; AYDOGAN, 2017).

A parte de baixo deste pressurizador contém hastes de aquecimento anular e também tem orifícios para permitir a entrada de água (*insurge*) e saída de água (*outsurge*). O pressurizador do IRIS possui um volume de 71 m³, dos quais 49 m³ são ocupados por vapor (Khatry; Aydogan, 2017).

Estes orifícios de pressão estão localizados logo abaixo das hastes de aquecimento, de modo que no *insurge* o fluido flua passado ao longo dos elementos do aquecedor. O volume de vapor é cerca de 1,6 vezes maior do que o espaço de vapor do pressurizador do AP1000, enquanto o IRIS tem menos de 1/3 da potência do núcleo. O grande volume de vapor em relação à potência é a razão principal por que o IRIS não requer aspersores no pressurizador, que são utilizados nos PWRs atuais para evitar que as válvulas de segurança do pressurizador levistem para quaisquer transientes de aquecimento do projeto (Carelli *et al.*, 2004).

AP1000 é um reator nuclear geral III+ avançado projetado pela *Westinghouse Electric Company* e foi certificado pelo NRC dos EUA. É um reator de água pressurizada aprimorado, projetado com vários recursos de segurança passiva, que depende de forças de gravidade natural, circulação natural e gases comprimidos para evitar superaquecimento ou contenção do núcleo. AP1000 apresenta componentes avançados de tanque de armazenamento de água passivo e entradas de ar para resfriar a temperatura do recipiente de contenção (Zhao *et al.*, 2020; Zhao; Yu, 2018).

Figura 9 – Pressurizador do IRIS



Fonte: Westinghouse, 2003.

O desenvolvimento de um pressurizador interno ao vaso levanta muitos problemas técnicos de interesse, como a manutenção da camada de água saturada e do controle da pressão em diferentes transientes operacionais. A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) foi um dos órgãos responsáveis pelo desenvolvimento do projeto do pressurizador do IRIS. Esse projeto inclui: o dimensionamento e volume de vapor-água; projeto da separação física entre o pressurizador e o reator; dimensionamento dos orifícios de surto; desenvolvimento de um isolamento térmico; e avaliação da dinâmica do pressurizador (Barroso *et al.*, 2003).

O reator IRIS é um projeto com uma configuração diferente quando se compara com os reatores PWRs convencionais. A questão da homogeneização do boro no interior do pressurizador do reator IRIS é muito importante durante as operações de elevação e redução de potência (Bezerra *et al.*, 2012). Em seu trabalho, Silva, (2008), através de uma nova metodologia de similaridade, conhecida como Análise de Escala Fracional, ou FSA (Zuber *et al.*, 2007), projetou uma seção de testes que representa a concentração de boro no pressurizador do reator IRIS. Foi determinada a ordem de grandeza dos principais parâmetros para construção de uma seção de testes, permitindo-se uma margem de segurança para ajustes posteriores.

Os principais parâmetros de uma seção de testes que representa com fidelidade a dependência temporal das concentrações de boro na região

compreendida entre a parte mais baixa do pressurizador, onde se encontra os orifícios de surto, e a região que fica acima, são apresentados na Tabela 3.

De acordo com os resultados encontrados por Silva *et al.* (2010), é desejado construir um modelo adotando uma escala de 1:200. No projeto IRIS, há oito orifícios de surto e oito orifícios de recirculação conectando o sistema primário ao pressurizador. Então, usando a simetria de um oitavo e o fator de escala volumétrica o modelo teria aproximadamente 0,25 m³ para a representação do sistema primário. Se uma escala de tempo igual a 1:5 é adotada, então, uma simetria de 1/8, o fluxo de circulação é próximo a 1,7×10⁻⁶ m³/s deve ser previsto considerando o modelo do sistema primário com água a uma temperatura próxima a 373 K (60 °C) (Nascimento, 2016).

Tabela 3 – Principais parâmetros do IRIS e da seção de testes

PARÂMETRO	PROTÓTIPO (IRIS)	MODELO (SEÇÃO DE TESTES)
Massa de líquido (kg)	18.833	151,83
Temperatura da água interna (K)	620	373
Temperatura da água de entrada (K)	603	306,3
Pressão de operação (MPa)	15,5	0,1
Vazão de circulação (m ³ /s)	0,000504	0,000011367
Taxa de condensação (kg/s)	0,00980	0,0004069
Potência térmica (kW)	53,91	5,47
Tempo de transitório (s)	108.000	21.16821
Diâmetro do orifício de surto (m)	0,05	0,0145
Material constituinte	Aço	Polícarbonato

Fonte: Silva, 2008.

A taxa de diluição/boraração do reservatório externo e o fluxo no sistema primário no modelo serão iguais a 1,97×10⁻⁵ m³/s e 2,24×10⁻² m³/s, respectivamente, em que 1/8 é considerado mais uma vez. Finalmente, se um usa a concentração de boro inicial no sistema primário/pressurizador para um modelo igual a 150 ppm, a concentração no reservatório externo igual a 50 ppm deve ser utilizada (SILVA; LIRA; BARROSO, 2010).

No Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), foi desenvolvido um experimento de engenharia nuclear: a criação de uma bancada experimental simplificada de baixa pressão em escala reduzida. Este projeto experimental foi projetado especificamente para simular o pressurizador do reator IRIS, com a intenção de investigar os processos cruciais de diluição e homogeneização do boro.

O reator IRIS é de grande relevância na indústria nuclear, tendo o Brasil como um dos membros do consórcio responsável pelo seu desenvolvimento. Este reator ganha especial importância em cenários de variações de potência, onde o equilíbrio homogêneo do boro no interior do pressurizador torna-se uma questão de suma importância.

O experimento, meticulosamente planejado e montado, envolveu o uso de um corante que possui propriedades físicas e químicas semelhantes às do ácido bórico, facilitando assim uma representação visual e em tempo real dos processos de interesse. A seção de testes, um componente fundamental deste experimento, foi fabricada em acrílico transparente. Esta escolha de material permitiu o acompanhamento de forma contínua e em detalhes a evolução da pluma formada pelo corante ao longo do tempo (Bezerra *et al.*, 2012).

A temperatura ambiente foi mantida constante durante todo o processo experimental, proporcionando assim condições controladas para o estudo. Esta bancada experimental, em sua simplificação e projeção, representa um passo significativo no avanço do entendimento dos processos de homogeneização e diluição do boro no pressurizador do reator IRIS. Além disso, forneceu uma base sólida para futuras pesquisas e experimentos nesta área da engenharia nuclear (Silva, 2008).

Os transitórios de potência devido às variações de concentração de boro no circuito primário do reator IRIS também foram simulados utilizando um modelo dinâmico implementado no programa SIMULINK do MATLAB (Magalhães *et al.*, 2013). Nesses estudos conduzidos, observou-se uma variação exponencial suave nos transitórios operacionais de boração e deboração no circuito primário do reator IRIS. Essa característica é influenciada pela diferença entre a concentração inicial de boro e a final desejada, bem como pela eficiência dos feedbacks neutrônicos ao enfrentar os transitórios, garantindo um retorno à criticalidade. Destaca-se ainda a sensibilidade da temperatura do combustível aos transitórios, e a variação linear da potência térmica no lado secundário dos geradores de vapor. O código MODIRIS, desenvolvido em SIMULINK/MATLAB, mostrou-se eficiente em processos com constantes de tempo semelhantes, embora possa ser desafiador quando há grandes disparidades nas constantes.

A pesquisa de Magalhães *et al.* (2013) complementa essa análise, confirmando que o MODIRIS foi extremamente eficaz tanto em cálculos de estado estacionário quanto em transitórios. Mais notavelmente, o código provou ser preciso ao calcular a

dispersão do boro, representando com precisão o comportamento esperado. Estes resultados são essenciais para o controle operacional e para assegurar a condição de segurança e a criticalidade do reator IRIS. Além disso, o código MODIRIS desenvolvido no SIMULINK se mostrou muito eficiente nos processos com constantes de tempo próximas. Entretanto, em processos com constantes de tempo com muitas ordens de grandeza de diferença o desempenho do código se mostrou fortemente dependente da máquina, o que representa uma pequena desvantagem (Nascimento, 2016).

Com as preocupações levantadas após o acidente de Fukushima, a possibilidade real de construção de um SMR foi reforçada. Entre as razões que contribuíram para isso, dois pontos pareciam estar especificamente ligados ao IRIS: (i) as análises de segurança IRIS mais extensa; (ii) o amplo número de trabalhos defendendo argumentos credíveis para apoiar o potencial de competitividade econômica dos SMRs (Petrovic *et al.*, 2012). No contexto desse momento histórico, e coordenadas pela IAEA, diversas atividades técnicas e programáticas internacionais sobre SMRs foram intensificadas. Ainda nos anos subsequentes ao acidente, isto é, primeira metade da década de 2010, várias iniciativas relacionadas aos SMRs emergiram na Europa e Ásia, mesmo em países tradicionalmente inclinados a reatores de grande porte, evidenciando um apoio crescente à tecnologia (Petrovic *et al.*, 2012).

2.5 FUNÇÃO DO BORO NO REATOR NUCLEAR

Um reator nuclear em condições normais de operação possui um nível de potência constante, nesse caso a taxa de produção de nêutrons através das reações de fissão e decaimentos radioativos deve ser equilibrada pela perda de nêutrons via absorção e fuga do sistema. Qualquer alteração dessa condição resultará em uma dependência temporal da população de nêutrons e, naturalmente, acarretará uma mudança no nível de potência do reator. O comportamento temporal de um reator nuclear depende essencialmente do balanço de nêutrons que são absorvidos, dos que escapam do sistema e os que induzem novas reações de fissão. O conhecimento do comportamento do fluxo de nêutrons e da reatividade do sistema nuclear é de fundamental importância para uma operação segura e controlada do reator. O controle

da criticalidade de um reator é realizado pelo uso de barras de controle e por diluição de boro na água do refrigerante do circuito primário (Bezerra *et al.*, 2012).

Quando um reator é desligado, o boro presente no refrigerante tem a função de manter o reator no estado de subcriticalidade. Caso seja introduzida, acidentalmente, água com baixa concentração de boro, é necessário se fazer uma homogeneização para que volumes de água contendo pouca quantidade de boro não atinjam o núcleo do reator e reiniciem a criticalidade (Magalhães, 2013).

O boro (B^{10}) é um excelente absorvedor de nêutrons térmicos e na forma de ácido bórico (H_3BO_3) diluído no refrigerante de reatores PWR, é utilizado no controle de reatividade. Do início ao final da vida de um ciclo de combustível de um reator, a concentração de boro no sistema de refrigeração do reator (SRR) é reduzida para compensar a queima do combustível. A questão da homogeneização se torna um fator de grande importância para a segurança na operação de um reator em função de manobras inadequadas na homogeneização do boro. Se uma grande quantidade de água com baixa concentração de boro, abaixo da concentração do SRR, for bombeada para o núcleo pode acarretar um aumento na potência do reator. O inverso acontece, caso a água possua uma concentração superior ao do SRR (Bezerra *et al.*, 2012).

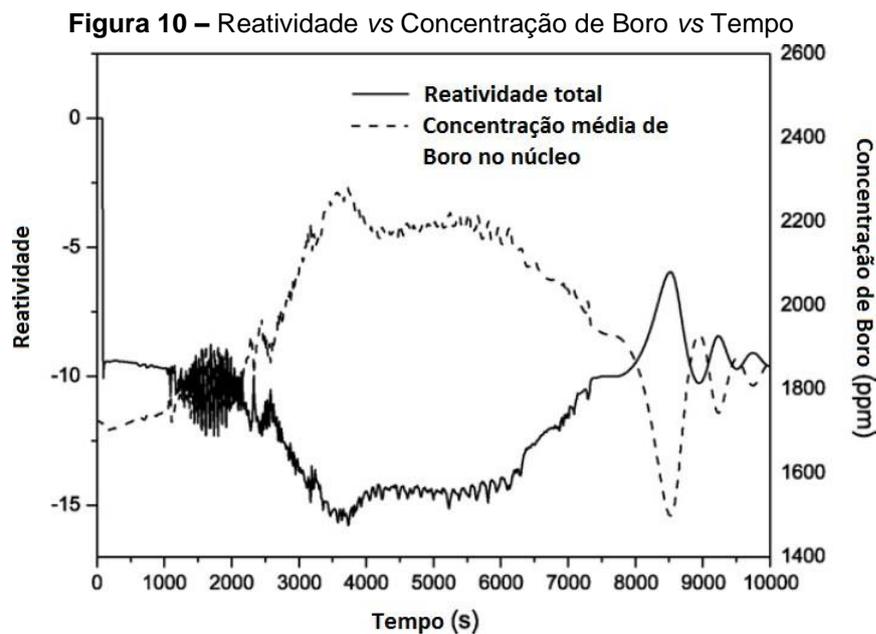
2.5.1 Análise da dispersão/concentração do boro

Estudos de transitórios da eficiência na homogeneização de boro em PWRs vêm recebendo bastante atenção nos últimos anos. Uma solução de ácido bórico é normalmente adicionada ao refrigerante do circuito primário, auxiliando no controle das taxas de fissão no núcleo do reator. Tal sistema, normalmente não consegue controlar, sozinho, a reatividade, já que a mudança na concentração de boro não atua tão rapidamente para satisfazer os requisitos de segurança, como o fazem as barras de controle (Magalhães *et al.*, 2013; Huang; Wang; Yuann, 2023; Lira; Lima; Silva, 2023; Yu *et al.*, 2020).

Durante a vida de uma usina nuclear, o reator estará sujeito a algumas situações anormais. Nessas situações, o operador da central deve tomar decisões rápidas para evitar ou minimizar as consequências de um acidente. Antes do acidente de Usina Nuclear *Three Mile Island*, pouco interesse existia no acidente conhecido como perda de refrigerante proveniente de pequenas rupturas (SBLOCA - *Small Break*

Loss-of-Coolant-Accident), uma vez que esse acidente era considerado menos severo que perda de refrigerante de grande intensidade, os conhecidos (LBLOCA – *Large Break Loss-of-Coolant-Accident*) (Bezerra *et al.*, 2012).

Freixa *et al.* (2009) realizou um estudo sobre transientes de reatividade através de um SBLOCA, onde é apresentado o comportamento da reatividade e da concentração média de Boro no núcleo do reator em função do tempo (Figura 10).



Fonte: Freixa *et al.* (2009).

Verifica-se que quanto maior a concentração de Boro, Figura 10, maior será a absorção de nêutrons, e menor será a reatividade. Ainda é possível verificar que a concentração média de Boro varia de 1500 ppm até 2300 ppm. E, de modo geral, os sistemas de injeção de emergência dispõem de tanques cuja concentração de Boro da ordem de 2000 ppm (Freixa *et al.*, 2009).

A mistura entre os fluidos com diferentes concentrações de boro depende da geometria do caminho de escoamento e, devido à complexidade geométrica dessa região em PWRs, a investigação feita com códigos computacionais (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) é complementada por análises experimentais para o fornecimento de dados espaciais e temporais confiáveis (Kiger; Gavelli, 2001; LI *et al.*, 2019; Silva, 2008).

A deficiência na homogeneização está relacionada a eventos externos ou internos que conduzem a formação, no sistema primário, de volumes parcialmente ou

completamente desprovidos de boro. Eventos externos que são aqueles caracterizados pela injeção de água pura ou solução diluída de boro proveniente, por exemplo, de tanques de acumulação dos sistemas de controle químico e volumétrico em operações inadequadas de desligamento. Já os eventos internos de diluição ocorrem no próprio sistema primário, como por exemplo, o fenômeno de transferência de calor nos regimes de vaporização-condensação (Rosa, 2013).

Estudos de homogeneização de boro em situações estacionárias e transitórias foram realizadas por Kliem *et al.* (2004) acoplando-se o código de neutrônica DYN3D e SAPR para modelagem de mistura de refrigerante. Nas análises, considerou-se inicialmente que água isenta de boro era formada em circuitos durante o desligamento do reator. Variando-se a quantidade inicial dessa água, foi verificado que, em uma situação estacionária, volumes inferiores a 14m³ não reconduziriam à criticalidade; já em situações transitórias, volumes superiores iriam inserir quantidades significativas de reatividade, conduzindo o reator à supercriticalidade.

Análises em transientes com diluição de boro que foram realizadas por Diamond *et al.* (2004), acoplando-se um código de neutrônica (PARCS – *Purdue Advanced Reactor Core Simulator*) e um de termo hidráulica (RELAP5). Vários eventos de diluição foram estudados com o objetivando avaliar o potencial de dano no combustível do reator. O estudo analisou as variáveis mais importantes, como o volume de água deborada e sua concentração de boro, e os resultados foram analisados em diferentes plantas.

Dando continuidade, diversos estudos têm abordado a dinâmica da diluição de boro em reatores nucleares, reforçando a pertinência e a relevância contínua deste tema. Por exemplo, Miró *et al.* (2011) mergulharam profundamente na integração de códigos de neutrônica e termohidráulica, como o PARCS e o RELAP5, para abordar as variações na concentração de boro e sua influência no desempenho do reator. O estudo destacou a importância da capacidade de simulação realista de movimentos de barras de controle e da variação da concentração de boro.

Além disso, Magalhães *et al.* (2013) se concentraram no reator IRIS, um SMR que possui uma configuração integral. O estudo explorou transientes de potência devido à variação da concentração de boro no circuito primário do reator IRIS e empregou o código MODIRIS para simulações, comparando os resultados com simulações do RELAP. De forma mais recente, Yarsky *et al.* (2023) forneceram uma avaliação detalhada das consequências da diluição de boro em condições além da

base de projeto no NuScale Power Module. Este trabalho evidenciou a importância da consideração cuidadosa da redistribuição de boro e dos fenômenos associados. Esses estudos exemplificam a evolução contínua e os avanços no entendimento da diluição de boro em reatores nucleares ao longo da última década.

2.6 SIMULAÇÃO EM CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

A engenharia nuclear é uma área que lida com aplicações complexas e desafiadoras, onde a segurança, a eficiência e o desempenho são fatores críticos. Dentre as técnicas empregadas nesta área, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) tem ganhado destaque como ferramenta essencial para simulação e análise de processos.

A CFD é um ramo da mecânica dos fluidos que emprega métodos numéricos e algoritmos computacionais para analisar e resolver problemas envolvendo escoamento de fluidos (Teimouri *et al.*, 2022). Esta metodologia tem sido amplamente aplicada na engenharia nuclear, uma vez que permite a simulação de processos em alta resolução e com precisão, contribuindo para a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos e o aperfeiçoamento das instalações nucleares (Colombo *et al.*, 2019).

Um dos principais campos de aplicação da CFD na engenharia nuclear é a análise de segurança dos reatores nucleares. A simulação de eventos transientes e acidentes permite avaliar o comportamento do reator e a eficácia dos sistemas de segurança, além de contribuir para a otimização de parâmetros e a prevenção de problemas. Por exemplo, o estudo do escoamento de fluidos refrigerantes em situações de perda de pressão ou acidentes severos é crucial para garantir a integridade dos componentes do reator e a segurança da operação (Toti; Vierendeels; Belloni, 2018).

Outra aplicação relevante na engenharia nuclear é a otimização do projeto de componentes e sistemas, como trocadores de calor, válvulas, canais de combustível e sistemas de refrigeração. A simulação computacional permite identificar gargalos no desempenho e avaliar diferentes configurações, auxiliando no desenvolvimento de soluções mais eficientes e confiáveis. Além disso, pode ser usado para prever a degradação e o envelhecimento dos materiais, contribuindo para a manutenção preventiva e a extensão da vida útil das instalações nucleares (Zong *et al.*, 2023).

A CFD também desempenha um papel crucial na análise de fenômenos de transporte e transferência de calor em reatores nucleares. A compreensão desses processos é essencial para garantir a eficiência na geração de energia e a remoção adequada de calor residual dos sistemas. Adicionalmente, tem sido empregada no estudo de fenômenos de dispersão e transporte de radionuclídeos em caso de acidentes nucleares, contribuindo para a elaboração de estratégias de mitigação e proteção ambiental (Buckingham *et al.*, 2015).

Estudos de diluição de boro em reatores nucleares também fizeram uso da ferramenta CFD, dentre vários estudos podemos destacar alguns como é caso de Höhne *et al.* (2008), que realizou estudos nas instalações de teste ROCOM, em escala 1:5, investigou a mistura de slugs deboratados com refrigerante no vaso de pressão de reatores de água pressurizada, dado que essa mistura atenua a inserção de reatividade no núcleo. A pesquisa avaliou a acumulação de condensado com baixo teor de boro, especialmente na vedação do circuito da bomba. Utilizando variações na rampa de fluxo e diferenças de densidade, foi possível validar o código CFD, confirmando sua capacidade de simular com precisão a dinâmica de fluxo e os efeitos de mistura de refrigerantes com densidades variadas.

Também, no estudo realizado sobre o reator nuclear IRIS, observou-se que sua estrutura integral permite a eliminação do sistema de spray, tradicionalmente usado para atenuar transientes e contribuir na homogeneização do boro. Uma pesquisa direcionou seu foco para uma modelagem dinâmica do pressurizador do IRIS, empregando a ferramenta CFD. Onde foi adotado um modelo tridimensional simétrico, que representa 1/8 da geometria total do reator, o estudo abrange a coexistência de quatro fases distintas, considerando, inclusive, as perdas térmicas no processo. As interações entre as fases, como transporte de massa, energia e momentum, foram analisadas e incorporadas código CFD (Sanz *et al.*, 2015).

Estudos de diluição de boro que investigou o fenômeno de mistura de boro em reatores, utilizando a técnica FIPL (fluorescência induzida por laser) com a solução Rhodamine-B como traçador. Essa técnica de visualização 2D não intrusiva mostrou que a concentração do traçador, medida em locais específicos, concordou em grande parte com as simulações feitas no CFD, apresentando uma concordância de até $\pm 20\%$ entre os resultados experimentais e de simulação (Eltayeb *et al.*, 2019).

Em suma, a dinâmica de fluidos computacional desempenha um papel fundamental na engenharia nuclear, auxiliando na análise de segurança, otimização

de componentes e sistemas, e na compreensão dos fenômenos de transporte e transferência de calor. A aplicação do CFD contribui para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e seguras, garantindo a sustentabilidade e a integridade das instalações nucleares.

2.6.1 ANSYS CFX

Dentre os softwares de simulação de dinâmica de fluidos computacional o ANSYS CFX se destaca por ter uma ampla gama de recursos e funcionalidades para modelagem e simulação de fluidos, permitindo que os usuários modelem e analisem sistemas complexos em uma ampla variedade de aplicações, desde aeroespacial até a engenharia de processos químicos. Isso inclui recursos para modelagem de escoamentos multifásicos, reativos e turbulentos, bem como acoplamento fluido-estrutura e transferência de calor (ANSYS CFX, 2023).

O ANSYS CFX resolve as equações de Navier-Stokes usando um método de volume finito baseado em elementos com esquemas de discretização de segunda ordem no espaço e no tempo. Ele funciona em tipos de malhas estruturadas e não estruturadas, bem como em misturas de ambas, que permitem que diferentes geometrias de células de malha, como hexaedros, tetraedros e prismas, sejam alinhadas em qualquer arranjo. Um algoritmo *multigrid* algébrico acoplado resulta em altas taxas de convergência e o solver pode ser executado em paralelo em clusters de computação para lidar com grandes casos de problemas (PAPUKCHIEV; YANG, 2021; GRAHN *et al.*, 2021).

2.7 ARDUÍNO

Arduino é uma solução de hardware e software de código aberto, desenvolvida inicialmente em 2005 no *Interaction Design Institute Ivrea*, com base no trabalho de tese de Hernando Barragán em *Wiring* (Barragán, 2022). O Arduino IDE foi construído sobre o ambiente de processamento já existente, com o objetivo de criar uma maneira fácil e de baixo custo para os alunos de design criarem dispositivos que pudessem interagir com seu ambiente. O Arduino foi, em 2020, uma das plataformas mais conhecidas usadas em projetos de computação física e ainda é amplamente utilizado em salas de aula em todo o mundo (em dezembro de 2020, a comunidade Arduino

incluía mais de 48 milhões de usuários com base nos downloads do IDE) (Roumen; Fernaeus, 2021).

Devido a sua versatilidade o Arduino tem sido empregado em diversos ramos da pesquisa na ciência e na engenharia, como na área de controle de processos (Bhamre *et al.*, 2023), transportes (Veeramanickam *et al.*, 2022), geração de energia (Debnath; Baidya; Ghosh, 2023), robótica (Oltean, 2019), medicina (Banerjee *et al.*, 2021), entre outras aplicabilidades.

Desde sua criação, o Arduino se tornou uma plataforma extremamente popular entre entusiastas e profissionais de eletrônica. A comunidade Arduino cresceu rapidamente e, atualmente, inclui uma ampla variedade de placas de hardware, bibliotecas de software e projetos de código aberto. A plataforma também é conhecida por sua compatibilidade com uma ampla gama de sensores e atuadores, o que facilita a criação de projetos interativos e inovadores. O sucesso do Arduino impulsionou o desenvolvimento de outras plataformas de hardware e software de código aberto, confiante para a expansão do movimento *maker* e do interesse em eletrônica e programação (Costa, 2017).

Pode-se perceber que o Arduino tem desempenhado um papel transformador na promoção da inovação e no estímulo à pesquisa em diversas áreas, democratizando o acesso à tecnologia e permitindo a criação de soluções eficazes e acessíveis. A versatilidade e facilidade de uso desta plataforma têm facilitado a colaboração e o compartilhamento de conhecimento entre entusiastas e profissionais, promovendo o desenvolvimento de projetos em setores como automação, monitoramento e tecnologia em geral.

Concordando com a ampla gama de aplicações e a versatilidade do Arduino descritas anteriormente, a plataforma foi escolhida como uma componente chave na bancada experimental para medir o nível de água na seção de testes. Graças à sua compatibilidade com uma diversidade de sensores e atuadores, o Arduino permitiu uma integração eficiente e de baixo custo com sensores de nível de água. Utilizando a IDE do Arduino, foi possível programar algoritmos específicos para coletar dados em tempo real, possibilitando uma análise mais precisa e sistemática do comportamento do nível de água durante o experimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Antes de entrar na metodologia adotada para obtenção de resultados, se faz necessário à apresentação da montagem experimental em escala reduzida que será utilizada neste trabalho e que também foi instrumento de pesquisa utilizado no trabalho, mais precisamente, na tese de Nascimento (2016). Esta montagem em escala reduzida, respeitando as condições de similaridade, representa 1/4 (um quarto) do pressurizador de um reator SMR. Serão apresentados detalhes da instalação experimental montada no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN/NE) e sua configuração inicial e final, depois de ajustes e adaptações devido a problemas encontrados.

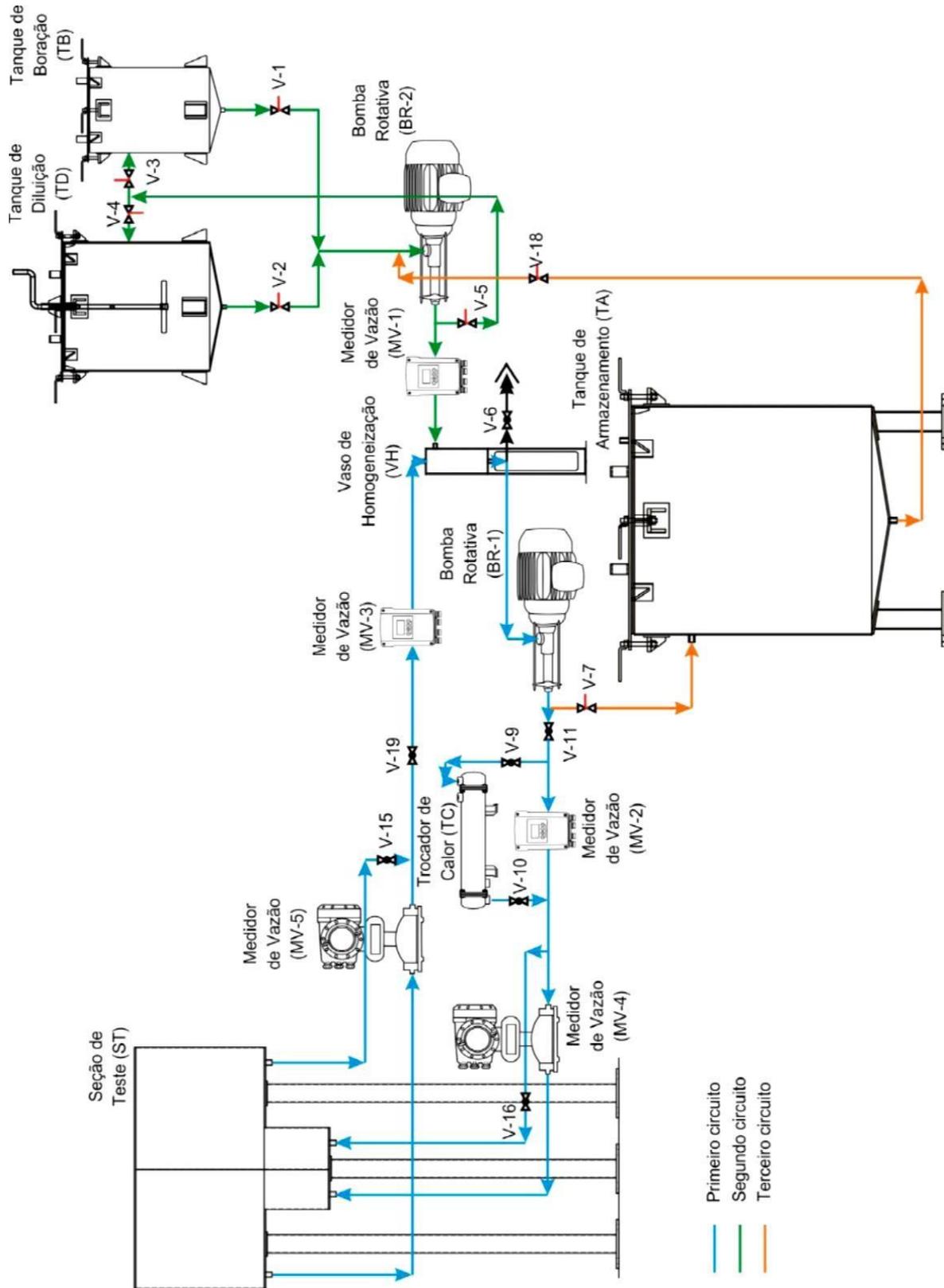
3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

Inicialmente a configuração da bancada, construída para o estudo da diluição de ácido bórico (H^3BO^3) no pressurizador de um SMR, era formada basicamente por 3 circuitos (Figura 11). O primeiro circuito é composto por uma seção de teste (ST), um vaso de homogeneização (VH), uma bomba rotativa (BR-1), dois medidores de vazão do tipo eletromagnético (MV-2 e MV-3), dois medidores de vazão do tipo mássico (MV-4 e MV-5), e um trocador de calor (TC). Esse circuito representava o ciclo correspondente a área de interação entre o circuito primário de um reator compacto integral e o acesso ao pressurizador. Com acionamento da bomba BR- 1, objetivando obter uma vazão mássica constante, de modo que a quantidade de água que alimenta a ST seja a mesma quantidade de água que sai da ST. A uniformidade da vazão era determinada através dos medidores de vazão, do tipo eletromagnético e do tipo mássico, instalados nesse circuito.

Para representar o sistema de controle químico e de volume, que é um circuito acoplado ao circuito primário, um segundo circuito composto pelo tanque de diluição (TD), o tanque de boração (TB), uma bomba rotativa (BR-2) e um medidor de vazão do tipo eletromagnético (MV-1). Esse circuito tem acesso ao primeiro circuito através do vaso de homogeneização. Por meio do acionamento da bomba BR-2, e o primeiro circuito é alimentado com água com concentração de Boro mais elevada, ou mais baixa. Para o suporte referente ao balanço de massa do sistema, o terceiro circuito foi

inserido com acesso ao primeiro e segundo, dispondo de um tanque de armazenamento (TA).

Figura 11 – Esquema inicial da bancada experimental



Fonte: Nascimento, 2016.

A seção de teste, apresentada na Figura 12, corresponde a 1/4 do pressurizador de um reator compacto e integral em escala reduzida de 1:200. Essa seção foi confeccionada em aço inoxidável com capacidade de aproximadamente 100 litros. A ST apresenta dois orifícios de entrada e dois orifícios de saída que representam os orifícios de surto de entrada e saída, respectivamente.

Figura 12 – Seção de Teste



Fonte: Nascimento, 2016.

Na operação da montagem experimental, na configuração supracitada, alguns problemas foram identificados, dos quais pode-se elencar:

- Os medidores de vazão mássicos MV-4 e MV-5 apresentaram uma resistência no fluxo de água;
- Fluxo de água invertido;
- Vazão instável.

Para solução destes problemas algumas medidas foram adotadas. O vaso de homogeneização foi retirado do circuito. Assim a água proveniente do tanque de boração (TB) e/ou do tanque de diluição (TD) passa pelo medidor de vazão MV-1 e vai para a bomba BR-1. Entre o medidor MV-1 e a bomba BR-1 foi alocada uma tubulação de polietileno natural instalada para verificar se possuía entrada de ar na área de sucção da bomba.

Com a retirada do vaso de homogeneização, optou-se por direcionar a água proveniente da saída da seção de teste para o tanque de armazenamento (TA). Esse ajuste permite estocar a água saída da seção, ou direcionar essa água para os tanques de diluição e/ou de boração através da bomba BR-2. A consequência direta dessa alteração foi a resolução do fluxo invertido no circuito. Pois o vaso de homogeneização, depois de diversos testes, era o responsável por essa anomalia no fluxo.

É importante destacar que após essa modificação a água proveniente do tanque de boração passou a ir direto para a entrada da seção de testes, sem que tenha uma mistura prévia na recirculação, isto é, a concentração na entrada da ST é igual ao do TB. A configuração sem o vaso de homogeneização também foi utilizada no trabalho de Nascimento (2016).

Com essa modificação, foi possível manter a vazão volumétrica na entrada e na saída da seção de teste aproximadamente constante por intervalos de tempo da ordem de 4 a 5 horas. O monitoramento da vazão é realizado por meio dos medidores de vazão MV-2 e MV-3, e os ajustes da vazão podem ser realizados por meio: (i) da frequência de rotação da bomba BR-1; (ii) das válvulas V-11 e V-19; ou (iii) controlando os níveis de água do tanque de boração ou de diluição. Para simular uma boração (ou deboração), será inserida água com uma concentração diferente da água presente na seção de teste. Como a montagem experimental dispõe de dois tanques sobre a plataforma metálica, a concentração diferente ficará em um tanque enquanto que o outro tanque dispõe de água com a mesma concentração que a seção de teste. No decorrer da operação, as válvulas V-1 e V-2 serão utilizadas para cessar a inserção de água com a mesma concentração e acionar a injeção de água com uma concentração diferente (Nascimento, 2016).

O trocador de calor apesar de indicado esquema não foi utilizado, foi feito um by-pass, pois os experimentos foram realizados a temperatura ambiente. A disposição

3.2 METODOLOGIA

Para atingir o objetivo propostos de instrumentalizar a bancada experimental neste trabalho e melhorar o desempenho na aquisição de dados foi necessária uma revisão e manutenção em seus equipamentos. Aplicar um processo de calibração dos instrumentos corrigindo erros, vícios e quaisquer irregularidades encontradas. Posteriormente, avaliar a configuração atual do sistema e definir a melhor disposição dos componentes a fim de evitar os problemas, tal como anteriormente encontrados.

3.2.1 Calibração e manutenção dos instrumentos

Prioritariamente foi realizada a verificação do funcionamento dos instrumentos da montagem experimental. Foi necessário ligar os instrumentos, operar, conferir sua atuação, corrente nominal, tensão elétrica, desgaste e quaisquer sintomas que possam influenciar no desempenho da montagem experimental.

Uma particular atenção foi dada a tubulação como um todo, nela correrá todo fluido observado e aferido no decorrer deste trabalho. A tubulação passou por uma limpeza, pois não pode conter impurezas, partes de oxidação depositadas vindos da seção de teste (ST) ou das bombas rotativas 1 e 2 (BR – 1 ou BR – 2), nem obstruções e sujeiras de uma forma geral. Juntamente com o tanque de diluição (TD) e tanque de boração (TB) e as válvulas espalhadas ao longo do circuito também foram verificadas, limpas e testadas em seu correto funcionamento.

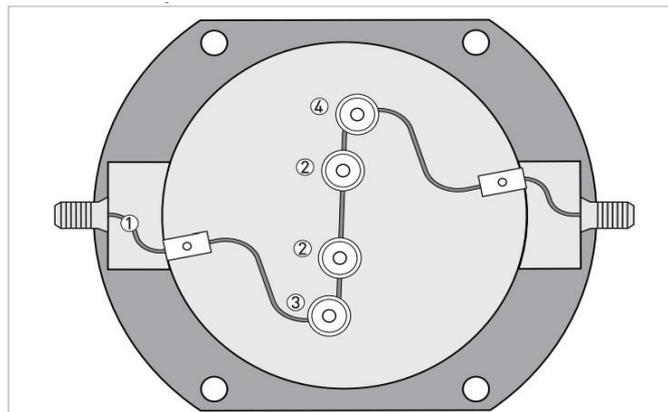
As bombas rotativas BR-1 e BR-2 passaram por uma verificação do seu funcionamento, sendo necessário realizar uma manutenção preventiva para verificação dos rolamentos, acoplamentos, de desgastes, folgas no eixo, se o enrolamento não sofreu adulteração na amperagem, rotores, estatores, lubrificação das partes móveis, calibragem das rotações com os correspondentes inversores de frequência. Uma das bombas precisou trocar seu selo mecânico, estator e rotor (parte hidráulica), pois devido ao desgaste não estava conseguindo atingir as vazões conforme o aumento da frequência estabelecida no inversor. Fato de suma importância, pois através do inversor de frequência são atribuídas as vazões de alimentação e saída do pressurizador, isto é, seção de teste (ST).

Os medidores de vazão do tipo eletromagnéticos (MV-1, MV-2 e MV-3), tiveram seus sensores avaliados. Durante os testes e calibração, feito por empresa

autorizada, ficou constatado que um dos sensores de um medidor de vazão estava com isolamento danificado e por este motivo o equipamento estava defeituoso. Este defeito não pode ser corrigido e inutilizou um medidor, o que resultou em menos um medidor de vazão na bancada experimental, ou seja, ficou no circuito, de uma forma geral, apenas o MV-1 e o MV-2. Após a calibração, estes medidores foram introduzidos novamente no circuito e re-testados para operar com vazões de 0 a 20 litros por hora (L/h). Os medidores de vazão do tipo mássico também passaram por testes e calibração, realizados por empresa autorizada, (MV-4 e MV-5), e foram novamente inseridos nos circuitos da bancada experimental e re-testados para operar com vazões de 0 a 20 litros por hora (L/h).

Durante o trabalho de Nascimento (2016) ficou comprovado que os medidores mássicos ofereciam uma pequena resistência ao fluxo de água em comparação ao fluxo nos medidores do tipo eletromagnético. Diante dessa constatação foi feita uma pesquisa junto ao manual do fabricante e a empresa autorizada, com intuito de saber se essa resistência é normal ou é fruto de alguma irregularidade. Após consulta ao manual do fabricante, foi possível obter a informação que o mecanismo usa um princípio de medição de tubo em “Z” de efeito Coriolis, como pode ser visto na Figura 14 (1 - tubo de medição, 2 - bobinas de acionamento, 3 - sensor 1 e 4 - sensor 2), sendo este o motivo da pequena (mas perceptível) resistência ao fluxo em comparação com o medidor de vazão do tipo eletromagnético, (Krhone, 2013).

Figura 14 – Princípio de medição (tubo Z simples) - Layout do tubo medidor, vista superior



Fonte: Krhone, 2013.

Após essa minuciosa manutenção no sistema da bancada experimental, os instrumentos equipamentos foram postos em funcionamento, mas numa configuração

geral, diferente da finalizada por Nascimento (2016), com o intuito aferir a normalidade na operação dos mesmos.

Em relação ao trocador de calor (TC), foi mantido fora do circuito de interesse, pois a proposta é realizar os experimentos de boração e deboração a temperatura ambiente, isto é, sem aumento ou decréscimo de temperatura durante o processo. O vaso de homogeneização (VH), também ficou fora do circuito de interesse, pois se buscou uma melhor precisão das concentrações que estavam entrando adentrando no pressurizador durante todo experimento. Fato que será melhor explicado na parte configuração e realização do experimento.

3.2.2 Instrumentação

A configuração da bancada experimental montada por Nascimento (2016), se apresenta como boa ferramenta para o estudo do pressurizador de um reator SMR, mas alguns processos puderam ser melhorados e automatizados. Abaixo serão elencados alguns componentes e instrumentos que tiveram sua configuração modificada e/ou acrescida na bancada experimental.

3.2.2.1 Sensor de nível na seção de testes (ST), tanque de boração (TB) e tanque de diluição (TD)

Todos os armazenadores ST, TB e TD, tinham seu nível aferido de forma interna, isto é, por faixas marcadas internamente no recipiente para determinar o volume de líquido. Para verificar o nível dentro do ST, TD e TB, foram feitas marcações para referenciar a quantidade de fluido. Para visualizar estas marcas é necessário, subir acima do ST, TD ou TB, retirar a tampa dos respectivos, e, visualmente constatar o nível. Essas faixas marcavam alguns volumes de interesse para realização do experimento.

A primeira solução desenvolvida foi a colocação de um nível externo com uma graduação e preencher com volumes conhecidos em intervalos de 20 litros para estimar uma relação entre graduação e o volume de líquido no interior dos armazenadores (Figura 16).

A segunda solução, foi uma com uma ferramenta tecnológica. Foi utilizado o Arduino Uno para monitorar o nível dos armazenadores de forma automatizada. Para

isso foi necessário a utilização de um micro controlador Arduino e o sensor nível ultrassônico HC-SR04. Existem vários modelos de sensores ultrassônicos disponíveis no mercado, mas o modelo HC-SR04 é o mais comum. Além deste sensor ser fácil de usar é amplamente suportado por bibliotecas de código aberto (Al-Agele; Jashami; Higgins, 2022; Smith *et al.*, 2022).

Figura 15 – Arduino UNO (esquerda) e Sensor de distância ultrassônico HC-SR04 (direita)



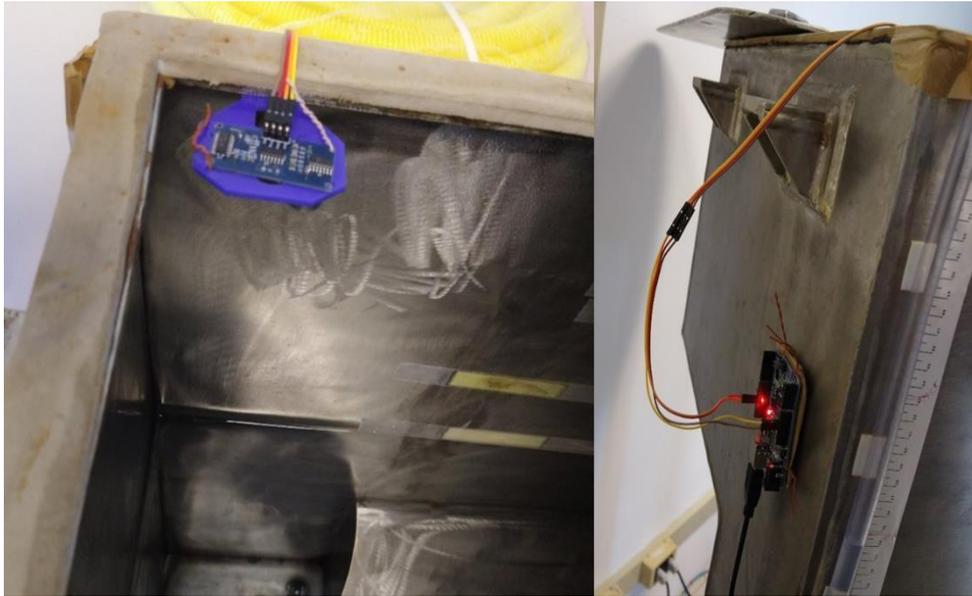
Fonte: Eletrogate, 2023.

Após programado no IDE (sigla para *Integrated Development Environment*, que em português significa Ambiente de Desenvolvimento Integrado) da própria plataforma do Arduino (Arduino, 2023), via porta USB, o micro controlador aciona o sensor de nível ultrassônico e retorna os valores para o IDE, assim o nível do armazenador em questão pode ser visualizado em tempo real no monitor do computador. Mas ainda assim fica difícil coletar os dados apresentados pois o IDE não os armazena, serve apenas como um mostrador dos valores medidos.

Para resolver o problema de aquisição e armazenamento de dados direto do arduino foi utilizado outro software que atuava na porta de comunicação entre o micro controlador e o IDE fazendo a leitura e armazenamento dos valores apresentados em arquivo .txt. O software utilizado para essa tarefa foi o *Processing*.

Os arquivos coletados na extensão .txt foram convertidos em dados de planilha e em seguida plotados em gráficos do volume de água (Apêndice A) O *Processing* é um *sketchbook* (caderno de rascunho) de software flexível e uma linguagem de programação de código aberto para aprender a codificar. (Processing, 2023).

Figura 16 – Arduino e sensor instalados na ST



Fonte: O Autor, 2023.

3.2.2.2 Sistema de aquisição de dados

Os medidores de vazão, apesar de monitorarem constantemente, a extração da informação, no decorrer do experimento, era copiada analogicamente direto do visor do aparelho, ou seja, copiada para um pedaço de papel ou introduzida manualmente numa planilha. Fato semelhante ocorria com o monitoramento da temperatura dentro da ST, que era feito através de um termômetro digital que era inserido no líquido para se obter essa informação.

A solução apresentada foi a instalação de um sistema de aquisição de dados. Este sistema é composto um equipamento de que lê as saídas analógicas dos medidores e sensores, as converte e armazena em dados para uma posterior análise. O equipamento utilizado para o sistema de aquisição de dados foi o FieldLogger, um *data logger* industrial de multicanais.

O FieldLogger é um registrador de dados versátil, poderoso e, ao mesmo tempo, econômico para manipulação de variáveis analógicas, digitais e outras, com grande resolução e velocidade. Trata-se de um equipamento de alto desempenho e alta conectividade, porém fácil de configurar e operar (Novus, 2023). Uma das vantagens desse registrador/controlador é a conectividade e acesso à internet, pois é possível configurar um link no qual pode-se ter acesso as leituras dos dados gerados pelos equipamentos, que estão em monitoramento, de forma remota.

Figura 17 – FiedLogeer – Data Logger Industrial Multicanais



Fonte: Novus, 2023.

Algumas características desse registrador: 8 canais de entrada analógica universais: Termopares, V, mV, mA, Pt100 e Pt1000; Taxas de leitura e registro dos canais de até 1000/segundo. Resolução de conversão A/D de 24 bits; 8 I/Os digitais (configurados individualmente como entrada ou saída); 2 saídas a relé (NA, NF e comum); Interface RS485 (Modbus mestre ou escravo). Ao atuar como um mestre, pode ler até 64 registradores de outros escravos. Os registradores lidos podem ser usados em registros, alarmes ou operações matemáticas. Interface ethernet com diversos serviços disponíveis. Envio de alerta de alarme por e-mail (SMTP). Fornece páginas web com canais e informações de status (HTTP). Permite o download de dados registrados via FTP (cliente e servidor). Acessa valores de status e canais através de software de gerenciamento de rede (SNMP e traps). Permite comunicação Modbus por interface ethernet (Modbus TCP): Interface USB-device para configuração, monitoração e coleta; Interface USB-host para coleta de dados via pen drive; até 32 alarmes configuráveis (NOVUS, 2023).

Com este equipamento todos os medidores, seja do tipo mássico ou eletromagnético, e sensor de temperatura, passaram a ser monitorados virtualmente e suas leituras armazenadas para posterior análise do comportamento dos experimentos.

3.2.3 Nova configuração da bancada experimental

Com a inserção de equipamentos na bancada experimental, também foi pensado uma nova configuração, que fosse mais ampla e que utilizasse toda capacidade que a ST pode proporcionar no estudo de boração e deboração. Para isso foi proposto que a ST teria suas duas entradas (linhas de surto) e duas saídas (recirculação) analisadas durante os experimentos.

Para que todas as entradas e saídas da ST funcionassem nos experimentos, foi necessária uma redistribuição dos recursos de medição no circuito. Como citado anteriormente, um medidor de vazão do tipo eletromagnético quebrou, e por isso, toda bancada experimental ficou apenas com 4 medidores.

Preliminarmente, para manter a configuração da bancada experimental mais próxima da disposição inicial, os medidores foram mantidos em série, ou seja, um medidor mássico em série com um medidor do tipo eletromagnético. No caminho de inserção (linhas de surto), após a saída do medidor mássico foi colocado uma bifurcação na tubulação onde seguiam para as entradas da ST (Figura 18). No caminho eliminação (recirculação), as saídas se encontravam numa tubulação única e passavam pelos medidores em série, massivo e depois do tipo eletromagnético (Figura 19).

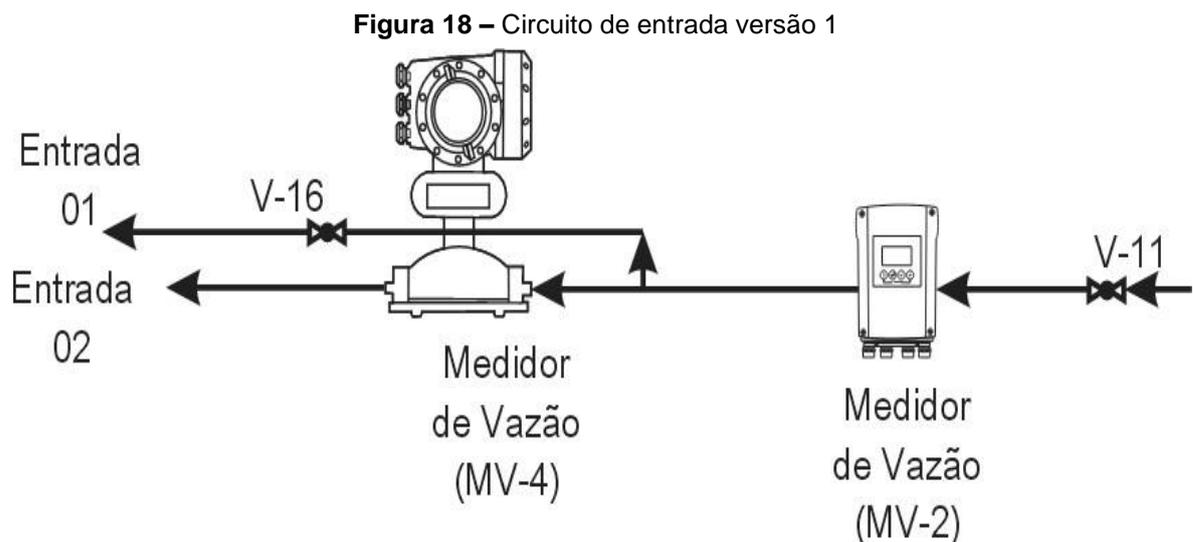
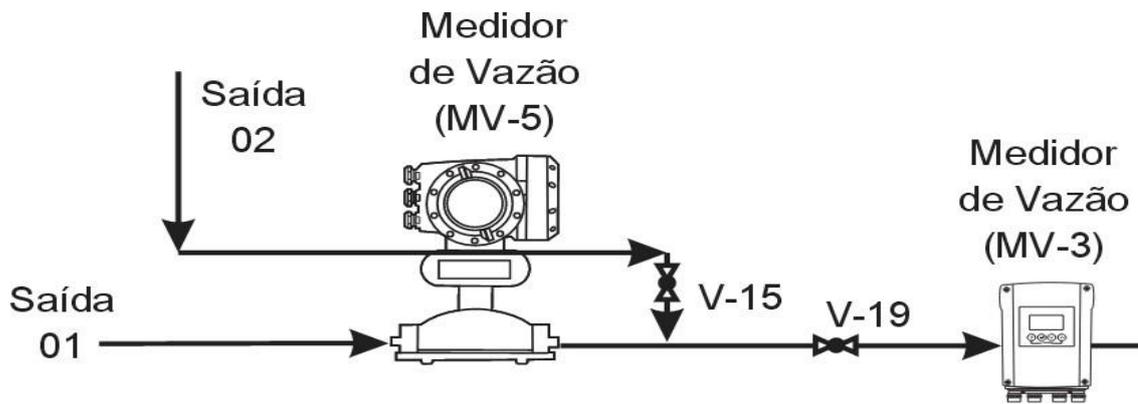
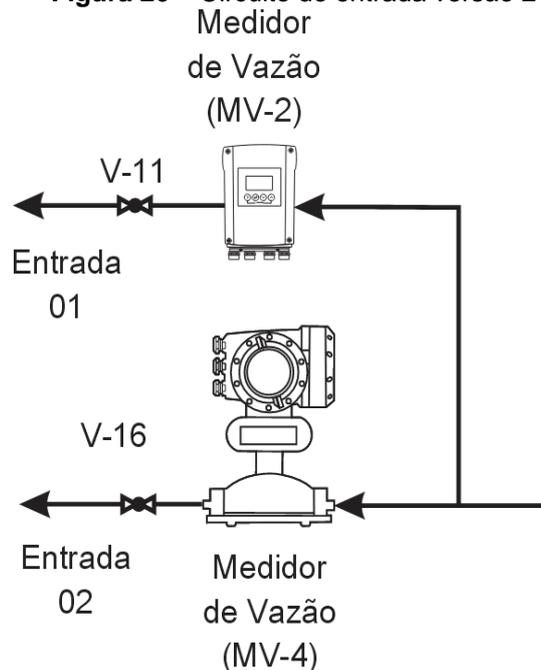


Figura 19 – Circuito de saída versão 2

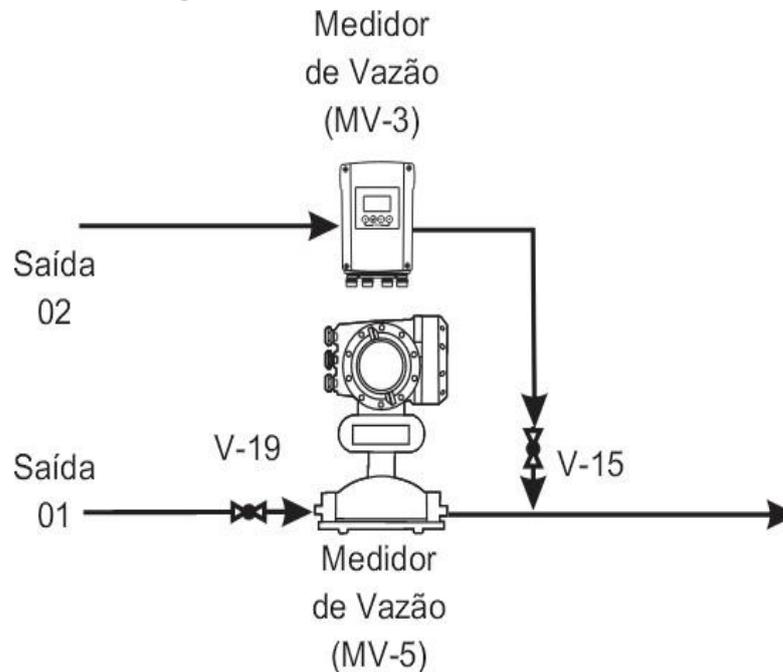
Fonte: O Autor, 2023.

Depois da análise dessa configuração chegou-se à conclusão que mesmo que a tubulação e a ST estivessem o máximo niveladas e as bombas rotativas com vazão constante, não se poderia garantir que após a bifurcação (antes das entradas) e antes da união (depois das saídas) as vazões seriam iguais em ambos ramos, pois ao se ajustar o medidor mássico ao medidor anterior, do tipo eletromagnético variava muito a sua leitura.

Outra configuração testada foi a formada por um medidor mássico e um do tipo eletromagnético em paralelo após a bifurcação, para as entradas (Figura 20), e antes da união, depois das saídas (Figura 21). Cada medidor de vazão ficou com uma válvula agulha individualmente para que se pudesse realizar o ajuste da vazão.

Figura 20 – Circuito de entrada versão 2

Fonte: O Autor, 2023.

Figura 21 – Circuito de saída versão 2

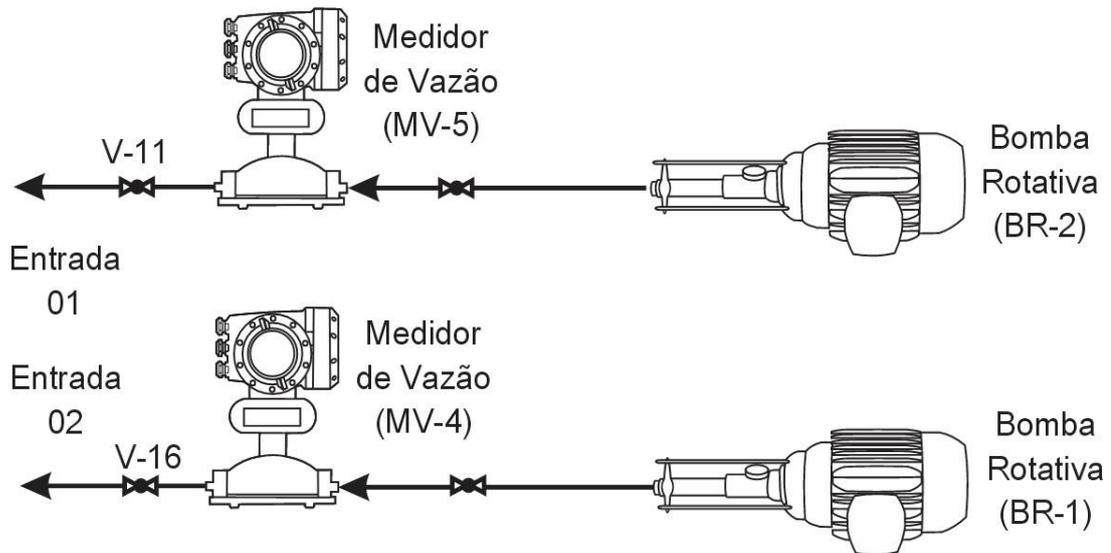
Fonte: O Autor, 2023.

Na análise dessa configuração as vazões ficaram registradas pelos medidores, podendo assim garantir por aferição direta do valor do fluxo em cada ramo da bifurcação. Entretanto, o problema de ajuste permaneceu, isto é, à medida que tentava-se ajustar a vazão no medidor mássico, a vazão no medidor do tipo eletromagnético variava muito. Isso tornou dificultoso o estabelecimento de fluxos iguais em ambos os ramos, sejam eles nas entradas ou nas saídas.

A princípio, foi pensando em não reformular o circuito da bancada como um todo, mas devido as dificuldades encontradas em garantir e estabelecer vazões iguais nas entradas e saídas, optou-se por deixar cada entrada e cada saída com um ajuste independente. Para resolver este problema uma série de modificações foram realizadas.

Para as entradas a solução encontrada foi colocar uma bomba rotativa em cada circuito de entrada, assim cada medidor não sofreria com um desbalanço no fluxo devido um ajuste de outro no circuito. Conjuntamente, devido à resistência característica do princípio de medição, os medidores de vazão mássico foram colocados em cada bomba rotativa, onde os efeitos dessa resistência seriam facilmente vencidos aumentando um pouco a rotação no inversor de frequência.

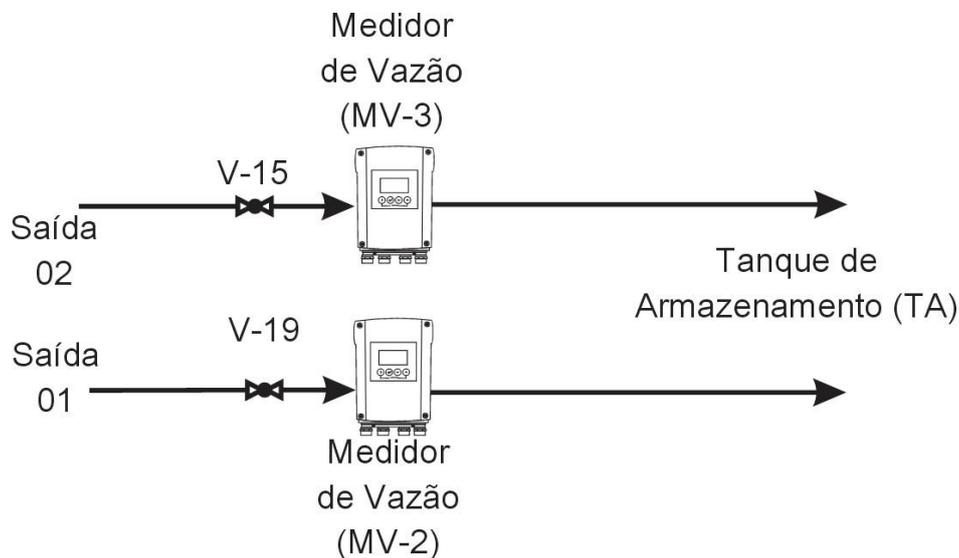
Figura 22 – Circuito de entrada versão final



Fonte: O Autor, 2023.

Nas saídas, também em circuitos independentes, foram instalados os medidores do tipo eletromagnéticos, onde também a saída é devido à gravidade. Como estes medidores não oferecem resistência na sua medição, ficou mais fácil estabelecer as vazões de saída através da válvula agulha.

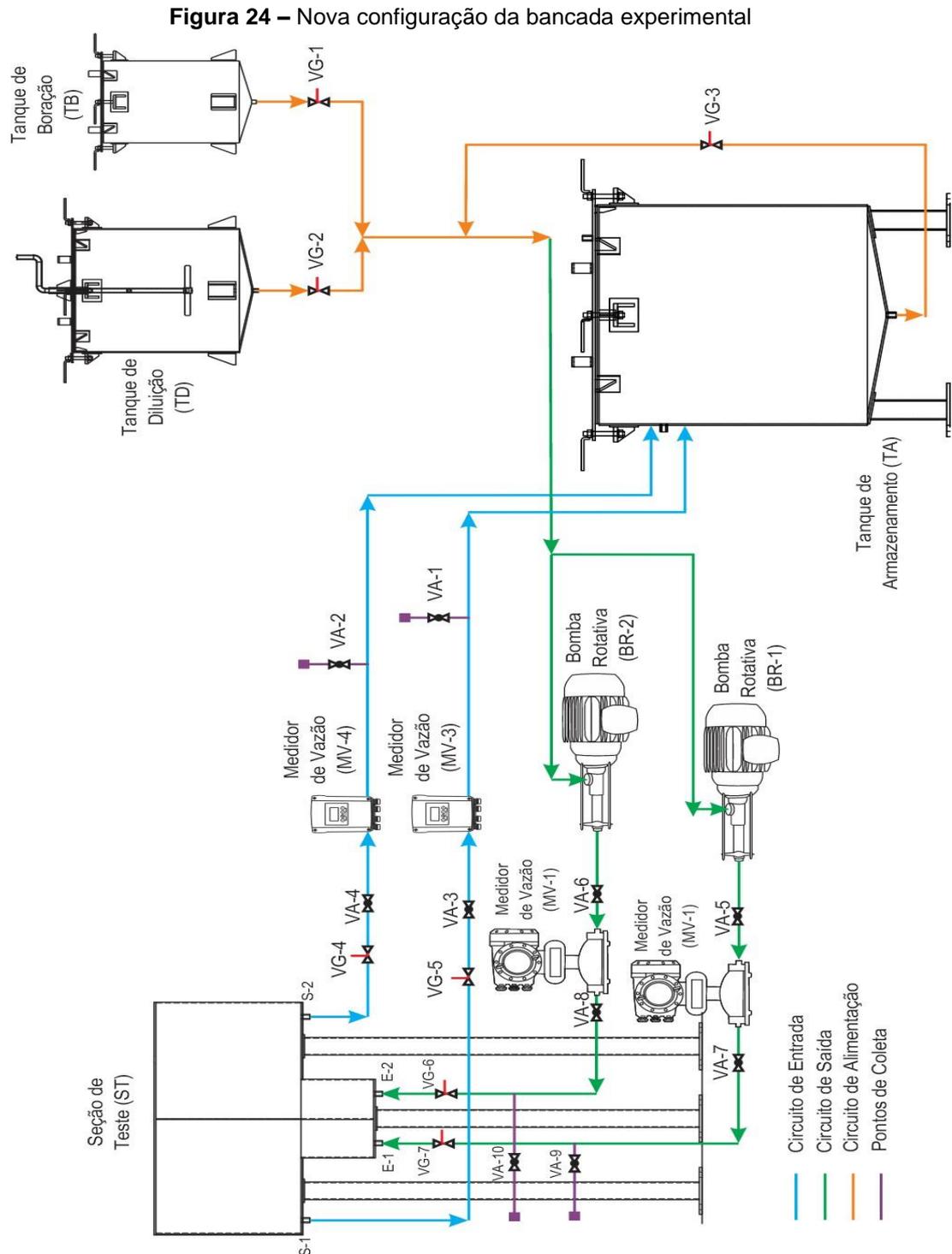
Figura 23 – Circuito de saída versão final



Fonte: O Autor, 2023.

De forma geral, devido aos rearranjos dos componentes no circuito geral da bancada experimental, uma nova configuração foi adotada. Alguns processos continuaram manuais, como: abertura de válvulas do tipo gaveta e do tipo agulha,

acionamento das bombas rotativas e mudança na rotação das bombas rotativas através inversor de frequência, como também a aferição da condutividade dos fluidos. Por outro lado, ficou mais fácil determinar e corrigir as vazões de entrada e saída, armazenar dados e monitorá-los. Na Figura 24 é mostrado a nova configuração da bancada experimental.



3.2.4 Realização de ensaio da bancada experimental

O procedimento de ensaio envolve abastecer o conjunto experimental (seus reservatórios e tubos) com água destilada, eliminar o ar da tubulação e analisar o desempenho do sistema de aquisição de dados em funcionamento. As metas para realizar o teste foram: (i) assegurar a estabilidade do fluxo volumétrico na entrada e saída da seção de testes (ST); e (ii) verificar se o sistema de aquisição de dados estava coletando e armazenando as leituras de vazão, temperatura e nível.

Para proceder com o ensaio, inicialmente e de forma manual o tanque de deborção (TB), o tanque de boração (TB) e o tanque de armazenamento (TA) foram enchidos com 40 litros de água destilada cada, sendo mantidos fechadas todas as válvulas agulha (VA) e válvulas gaveta (VG). A seção de testes (ST) permaneceu vazia. Para retirar o ar do circuito de alimentação as três válvulas gavetas, VG-1, VG-2 e VG-3, foram abertas por um tempo de aproximadamente dois minutos. Esse tempo foi suficiente, pois tanto o TB como TD estão em desnível com o TA, e, por esse motivo, devido à gravidade a tubulação do circuito de alimentação fora toda preenchida. Após isso todas as válvulas da bancada experimental foram fechadas.

Para retirar o ar do circuito de entrada, as válvulas agulha VA-5, VA-6, VA-7, VA-8, VA-9 e VA-10, como também a válvula gaveta VG-1, foram totalmente abertas. Em seguida as bombas rotativas BR-1 e BR-1 foram ligadas a uma baixa rotação, aproximadamente 5 Hz. Pouco tempo depois, nos pontos de coleta do circuito de entrada a água começou a sair de forma intermitente e sem seguida em fluxo contínuo, demonstrando que o ar da tubulação tinha saído, mas por garantia foi deixado funcionando desta forma por cinco minutos. Após isso as BR-1 e BR-2 foram desligadas. Mesmo com as bombas rotativas desligadas, foi observado que o ramo do circuito de entrada associado a BR-1 ainda fluía água pelo seu ponto de coleta, enquanto que o ramo associado a BR-2 não havia fluxo. Pode-se chegar à conclusão que o BR-1 já apresenta alguma folga ou desgaste entre o rotor e estator da sua motobomba, diferentemente da BR-2, que passou por uma manutenção corretiva recente, onde as peças mencionadas foram trocadas. Posterior a esta constatação as válvulas VA-9 e VA-10 foram fechadas.

Antes da retirada de ar do circuito de saída a seção de testes (ST) precisou ser enchida. Então as válvulas gaveta VG-6 e VG-7 foram abertas, o sistema de aquisição

de dados, medidores de nível, medidores de vazão e as bombas rotativas (BR-1 e BR-2) foram ligados.

Enquanto a ST enchia, as bombas rotativas, o sistema de aquisição de dados, medidores de nível e os medidores de vazão foram analisados.

- **Bombas rotativas:** foram testadas várias frequências de rotação e as bombas rotativas respondiam conforme o aumento ou diminuição dessas frequências. Também foi verificado que para uma frequência fixa, a BR-2 mantém uma vazão mais estável, mesmo com a diminuição da coluna de água do TB e aumento da coluna de água na ST, em relação a BR-1. Isso ficou mais perceptível quando a VG-3 foi aberta e a VG-1 foi fechada, tornando a alimentação das bombas rotativas exclusivamente do tanque de armazenamento (TA). Quando isto ocorreu a vazão da BR-2 quase não mudou, enquanto na BR-1 a vazão diminuiu. Outro fato observado é que para manter a mesma vazão as bombas rotativas utilizam frequências diferentes.
- **Sistema de aquisição de dados:** os dados gerados nos medidores vazão estava sendo armazenados e mostrados no Field Logger. Através de seu visor, como também transmitidos via Wi-Fi via endereço de rede, podendo ser acessados através de um navegador ou browser em computador, como Google Chrome, Mozilla entre outros.
- **Medidores de Nível:** através da IDE do Arduino foi verificado que os medidores de nível estavam realizando as medições. Alguns testes realizados com os medidores de nível, comparando o que era registrado no sensor e que era medido com uma régua, mostraram que pode haver uma variação máxima de $\pm 0,9$ cm nas medidas. É importante salientar que por estarem instalados na parte de cima dos reservatórios, quanto maior a medida, menos líquido o reservatório possui.
- **Medidores de vazão:** apresentaram um excelente comportamento, não havendo falhas ou distorções nas suas saídas analógicas, sendo fielmente transmitido para o sistema de aquisição de dados.

Após a ST está com aproximadamente 30 litros, o sensor de temperatura foi fixado na face do líquido na parte interna da ST, para que essa grandeza também fosse registrada pelo sistema de aquisição de dados. As válvulas gaveta VG-4 e VG-

6, e as válvulas agulha VA-3 e VA-4 foram totalmente abertas. Foi verificado, 2 minutos depois, no tanque de armazenamento, que os fluxos se mantiveram constantes, isto é, que todo ar na tubulação do circuito de saída havia saído. Entretanto, os medidores de vazão (MV-3 e MV-4) apresentaram um valor de erro nas medidas. Com isso foi constatado que as válvulas agulha VA-3 e VA-4 totalmente abertas deixam passar uma vazão superior a 20 litros/hora, vazão máximo a qual medidores foram calibrados e por isso a leitura de erro.

As válvulas VA-3 e VA-4 foram fechadas, depois abertas lentamente até que em ambos os ramos do circuito de saída os medidores de vazão (MV-3 e MV-4) marcassem 10 litros/hora. Para estabelecer essa vazão as válvulas VA-3 e VA-4 precisaram ser abertas pouco mais de $\frac{1}{4}$ de volta. O que significa que a água descendo por gravidade da ST, no circuito de saída, pode atingir uma vazão bem mais alta que 20 litros/hora. Também, que para se estabelecer o ajuste da vazão de saída é necessário ajustar as válvulas agulha VA-3 e VA-4.

Em seguida as bombas rotativas (BR-1 e BR-2), foram ajustadas em suas frequências para uma vazão de 10 litros/hora. Desta forma, ambas as entradas e saídas ficaram com a mesma vazão. Durante esse ajuste a válvula gaveta VG-2 foi aberta e a VG-1 fechada, pois o TB já estava com o nível muito baixo. Quando todas vazões estabilizaram em 10 litros/hora, a bancada experimental ficou em observação por um tem de 90 minutos.

A conclusão do ensaio após a estabilização (90 minutos finais) foi que as vazões, tanto de entrada como de saída, ao longo dos experimentos, precisam ser minimamente ajustas, ou seja, pequenas correções, da ordem de $\pm 0,5$ litros por hora. E, que os medidores de vazão do tipo eletromagnético (MV-3 e MV-4) são mais instáveis na leitura do que os medidores de vazão mássico (MV-1 e MV-2).

3.3 PREPARAÇÃO E ETAPAS ANTERIORES À REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Na preparação dos experimentos a seguir vários processos foram realizados até que o primeiro caso fosse rodado. Abaixo, alguns desses procedimentos sem os quais não poder-se-ia omitir, pois informa de maneira a dar melhor entendimento aos passos subsequentes na etapa de realização dos experimentos.

3.3.1 Escolha do elemento traço

O ácido bórico apresenta baixa dissolução em meio aquoso, isto é, é um ácido fraco, o que significa que ele não se ioniza completamente em solução aquosa. Ele tende a perder um próton (H^+) de cada vez, em um processo sequencial que ocorre em três etapas (Atkins; Jones; Laverman, 2018):

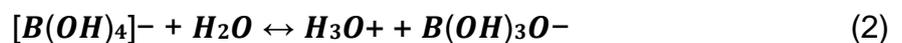
Primeira etapa:



Nesta primeira etapa, uma molécula de ácido bórico (H_3BO_3) reage com uma molécula de água (H_2O), resultando na formação de um íon hidrônio (H_3O^+) e um íon borato ($B(OH)_4^-$).

Esta é a principal etapa de ionização e ocorre com a maior facilidade.

Segunda etapa:



Na segunda etapa, um íon borato reage com outra molécula de água para formar outro íon hidrônio e um ânion dihidroxiborato. Esta etapa ocorre com menor frequência do que a primeira (ATKINS; JONES; LAVERMAN, 2018).

Terceira etapa:



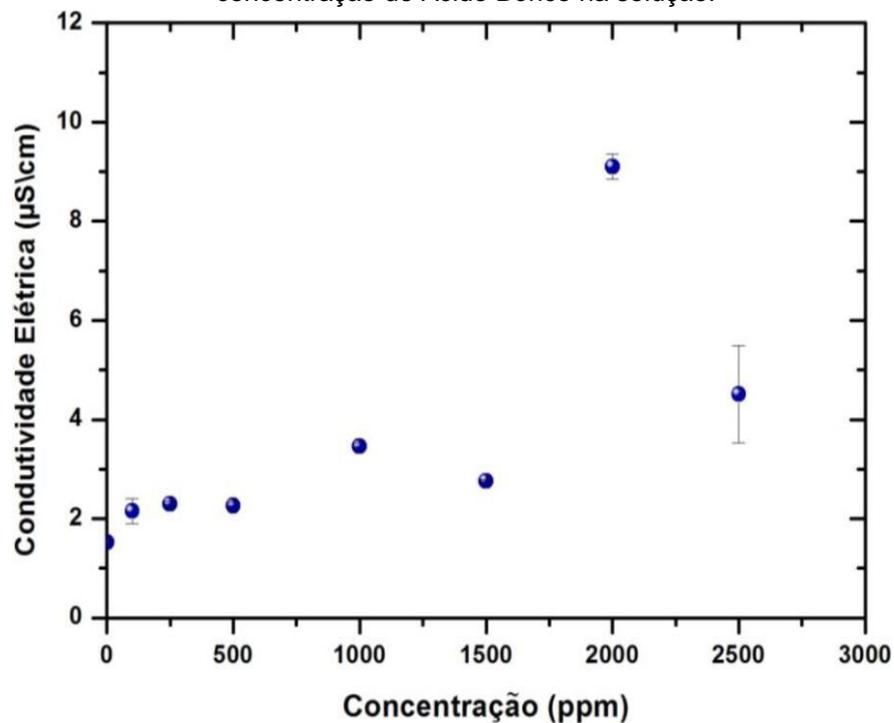
Finalmente, na terceira etapa, o ânion dihidroxiborato reage com uma terceira molécula de água para formar mais um íon hidrônio e um ânion trihidroxiborato. Esta etapa é a menos comum de todas (Atkins; Jones; Laverman, 2018).

As duas últimas etapas contribuem para a acidez do ácido bórico, mas a sua extensão é muito menor em comparação com a primeira etapa. No entanto, a primeira ionização é a mais relevante, enquanto as duas seguintes ocorrem apenas em

extensão muito menor. Devido à sua fraca acidez, o ácido bórico não causa uma mudança significativa no pH quando dissolvido em água destilada, tornando mais difícil detectá-lo com um medidor de pH. Portanto, o grau de ionização do ácido bórico é geralmente baixo, indicando que a maior parte das moléculas permanece na forma não ionizada quando dissolvidas em água (Atkins; Jones; Laverman, 2018).

Também, conforme constatado no trabalho de Nascimento (2016), o ácido bórico não apresentou um comportamento linear de condutividade elétrica em função da sua concentração em água destilada (Figura 25).

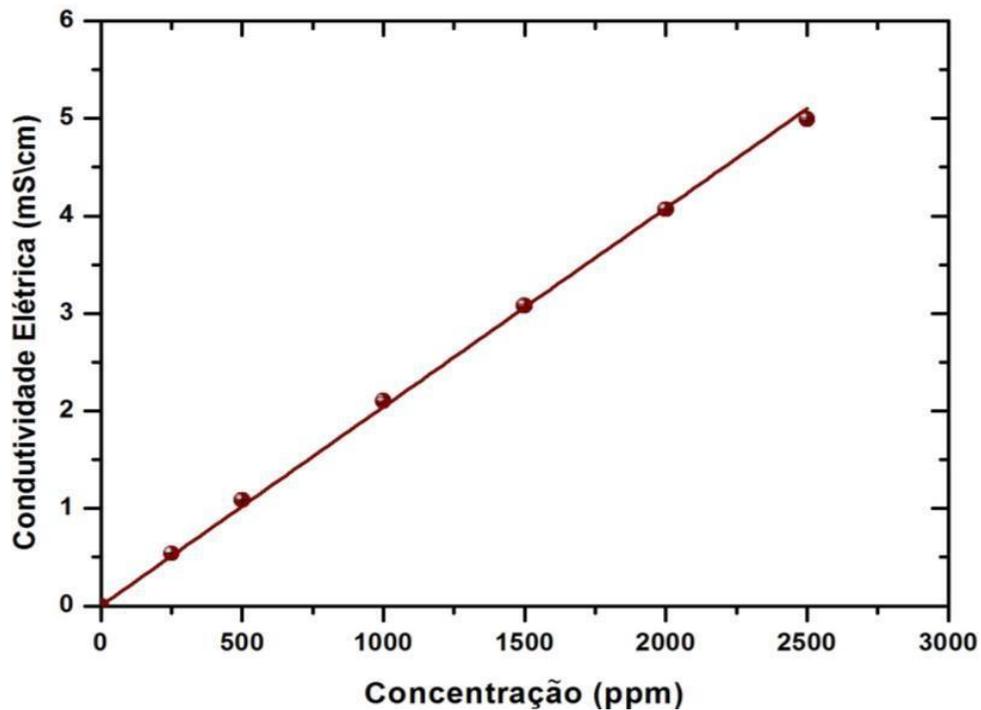
Figura 25 – Condutividade elétrica da solução de Ácido Bórico em água destilada em função concentração de Ácido Bórico na solução.



Fonte: Nascimento, 2016

Por outro lado, o Cloreto de Sódio ($NaCl$) apresentou um comportamento linear de condutividade elétrica em função de sua concentração em água destilada, e se mostrou um bom elemento traço para viabilizar o estudo de dispersão dentro da seção de teste (ST) (Figura 26).

Figura 26 – Condutividade elétrica da solução de Cloreto de Sódio em água destilada em função concentração de Cloreto de Sódio na solução.



Fonte: Nascimento, 2016

No contexto de diluição em reatores nucleares, o ácido bórico, que doravante passar-se-á a chamar boro, é o principal elemento de interesse, devido à sua capacidade de absorção de nêutrons. No entanto, sua condutividade elétrica em água destilada não apresenta um comportamento linear, conforme constatado no trabalho de Nascimento (2016). Esta não-linearidade pode introduzir desafios adicionais ao monitoramento e à quantificação de sua dispersão em ambientes aquosos.

Por outro lado, o cloreto de sódio (NaCl) exibe uma linearidade clara na relação entre a condutividade elétrica e sua concentração em água destilada. Este comportamento linear facilita significativamente a monitorização e a análise da sua dispersão. Ademais, a solubilidade do cloreto de sódio em água é alta e rápida, o que torna sua dispersão mais uniforme e previsível em comparação ao boro (Atkins; Jones; Laverman, 2018).

Contudo, é fundamental reconhecer que, independentemente da facilidade de monitorização e das propriedades desejáveis do cloreto de sódio, ele ainda é uma substância diferente do boro. Embora o cloreto de sódio sirva como um bom substituto, as particularidades intrínsecas ao boro não podem ser totalmente replicadas por outro composto. Ainda assim, considerando as limitações e os objetivos específicos do

estudo, o cloreto de sódio se mostra um bom substituto a análise em questão. A técnica de condutividade elétrica empregando sal já foi e ainda é utilizada em diversos trabalhos para investigação da dispersão e diluição de boro em reatores nucleares do tipo PWR (Dury; Hemström; Shepel, 2008; Eltayeb *et al.*, 2019; Höhne *et al.*, 2008; Kliem *et al.*, 2008; Teschendorff; Umminger; Weiss, 2001; Zhang *et al.*, 2023).

3.3.2 Simulação CFD da bancada experimental

As simulações numéricas fornecem uma ferramenta útil para reduzir as despesas experimentais de grandes projetos como de um reator nuclear do tipo SMR. Essas reduzem custos com material, montagem, protótipos e reengenharia. Contudo, mesmo que uma simulação se aproxime muito da realidade, sempre existirá uma incerteza inerente ao método empregado. Devido a bancada experimental, surge a oportunidade de se confrontar uma simulação com um modelo em escala reduzida para validá-lo e torna-lo mais confiável para aplicação em escalas maiores e reais.

Neste contexto, a modelagem CFD é empregada na concepção de equipamentos na indústria, pois permite prever acidentes ou prever seu desempenho em diversos tipos de aplicações. Como o objetivo de modelar a dinâmica e a investigação dos transientes de diluição do boro em um pressurizador de um reator SMR a análise numérica será realizada usando o código CFD comercial ANSYS-CFX, que aplica o método de volume finito para resolver as equações de massa, momentum e conservação de energia.

Atualmente, a abordagem mais convencional para modelagem de fluidos bifásicos de CFD com frações de volume significativas das duas fases é a descrição Euleriana da interpenetração contínua. Este modelo resolve um número 'n' de equações de fase separadamente, assumindo uma das fases como suporte primário das outras. Para fluxos borbulhantes, a equação de energia é resolvida apenas para líquidos, enquanto o vapor é considerado saturado em todo o volume. Na presença de fluidos, que são simultaneamente multifásicos e multicomponentes, o código fornece apenas a estrutura principal para o cálculo das equações básicas. O usuário deve programar os relacionamentos e eles podem ser incorporados no código usando expressões no CFX Expression Language. A definição de subdomínios permite a incorporação de fontes e sumidouros nas equações de continuidade e energia (SANZ *et al.*, 2015)5). O modelo matemático do pressurizador deverá considerar diversos

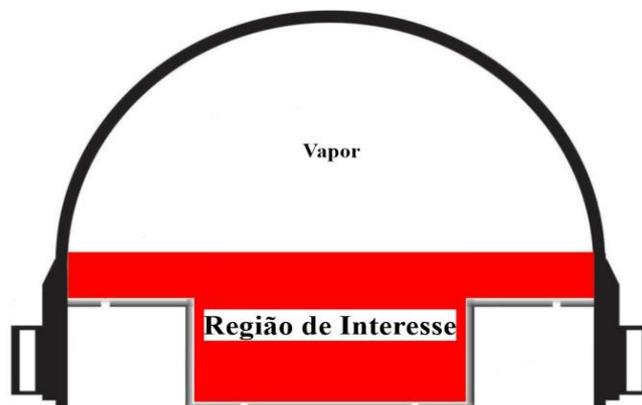
fatores, dentre eles podem ser destacados o modelo de turbulência, transferência nas interfaces, etc.

Os parâmetros geométricos, volume inicial de vapor e volume inicial do líquido, foram obtidos diretamente da a geometria de interesse, isto é, da seção testes (ST). Será um modelo tridimensional da ST da bancada experimental, que equivale a 1/4 de um pressurizador de um SMR em escala reduzida. Esse será importado para o ANSYS-CFX, onde serão feitos os devidos ajustes e refinamentos na malha gerada, que discretiza o domínio em volume finito, para uma melhor convergência e resultados satisfatórios na simulação da dispersão do boro.

3.3.2.1 Construção da geometria

No curso do projeto de modelagem, a configuração da simulação foi meticulosamente planejada para aproveitar a simetria do sistema em estudo, e assim, apenas 1/4 do pressurizador foi efetivamente utilizado na construção do modelo. Tal escolha baseia-se no princípio de que, dada a simetria estrutural inerente ao pressurizador, o quarto em questão é uma representação precisa e eficaz de todo o sistema. No entanto, deve-se salientar que as paredes deste 1/4 podem influenciar na precisão e eficácia das medidas experimentais. A Figura 27 oferece uma ilustração clara do segmento que foi incorporado ao modelo no software de simulação. Além disso, foi considerado o fato de que a presença de boro na região de vapor pode ser desconsiderada sem prejudicar a precisão ou a validade dos resultados da simulação (Rosa, 2013).

Figura 27 – Região de interesse na simulação

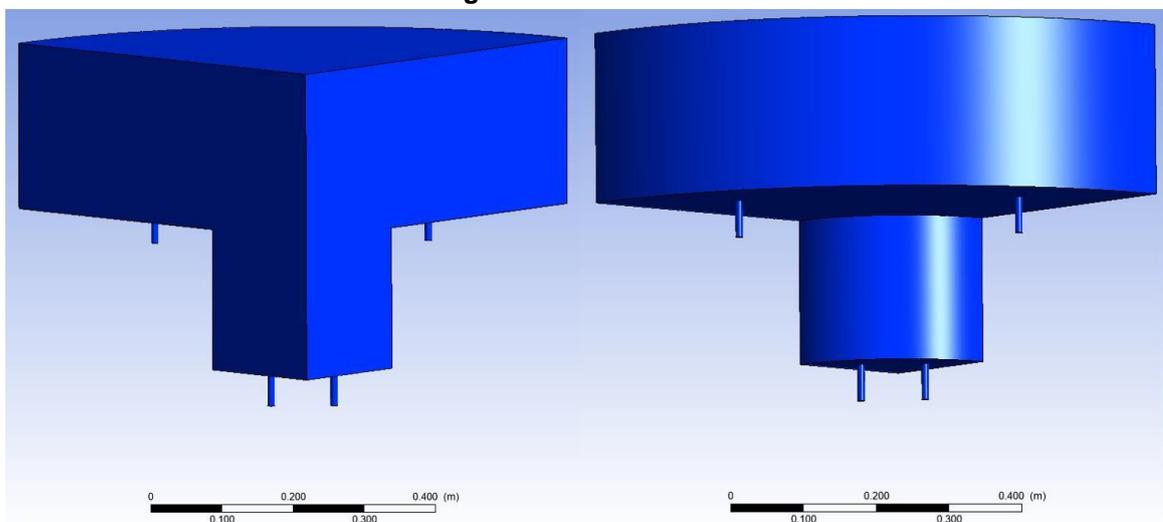


Fonte: O Autor, adaptado de WESTINGHOUSE, 2003.

Por outro lado, é importante salientar que a execução da simulação foi conduzida sob condições semelhantes ao do experimento, especificamente a temperatura ambiente (aproximadamente 27 °C) e a pressão atmosférica padrão. Tais parâmetros foram selecionados com o objetivo de simular de maneira mais realista as condições de operação do experimento realizado na bancada experimental. A inclusão desses detalhes ambientais permite uma representação mais precisa do comportamento do pressurizador, contribuindo para a relevância e aplicabilidade dos resultados da simulação.

Para as simulações, uma representação geométrica foi criada no software de modelagem computacional, a construção de modelos geométricos precisos e a delimitação do domínio físico são essenciais para simulações propostas. Esta visualização, emulando a geometria da Seção de Testes (ST), ajuda a interpretar corretamente os resultados das simulações. Na Figura 28, apresenta-se a modelagem, que corresponde a apenas 1/4 da totalidade de um pressurizador.

Figura 28 – Geometria



Fonte: O Autor, 2023

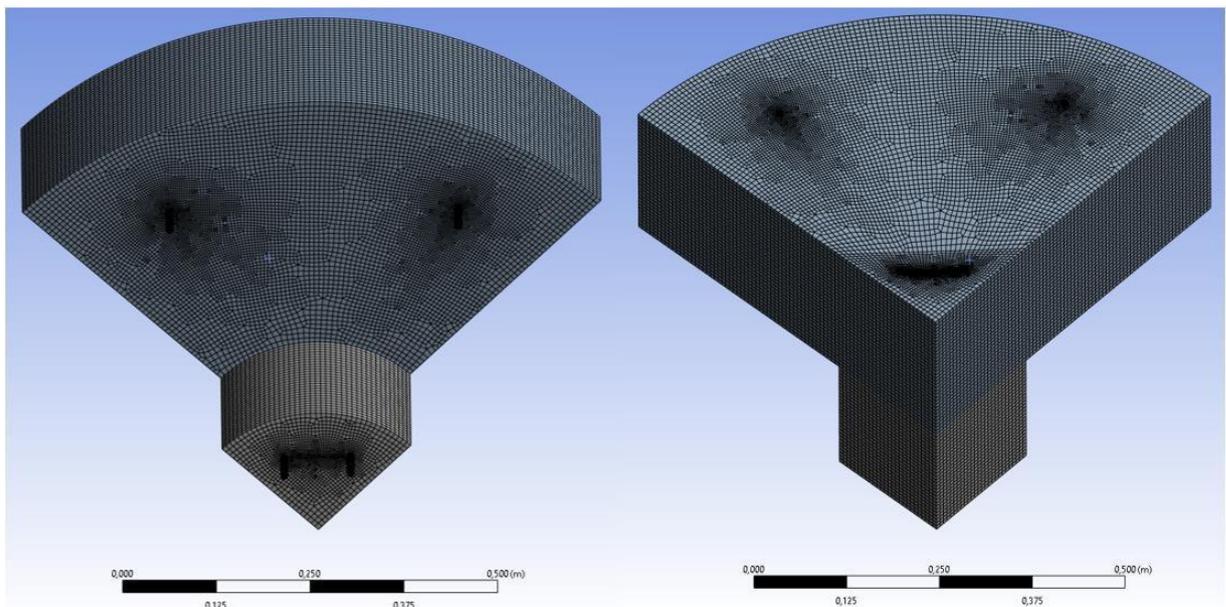
A elaboração da geometria do experimento foi meticulosamente modelada e construída utilizando o Design Modeler, uma sofisticada e robusta ferramenta computacional que integra a plataforma ANSYS (ANSYS CFX, 2023). É importante ressaltar que a representação geométrica apresentada, apesar de sua complexidade e detalhamento, foi concebida para representar exclusivamente a quantificação volumétrica da água presente dentro da seção experimental, que foi submetida a

testes no âmbito do experimento. Este parâmetro na geometria serviu para controlar as condições experimentais através da simulação no ANSYS.

3.3.2.2 *Elaboração da malha*

A geometria construída é importada na plataforma de simulação ANSYS. Esse processo desempenha um papel fundamental na criação subsequente da malha, uma representação matemática discretizada do domínio físico em questão. Este procedimento de discretização divide o domínio contínuo em uma série de volumes finitos, permitindo a resolução de problemas complexos através de cálculos iterativos (Ansys Cfx, 2023; Filho, 2009; Peixe; Belytschko. Ted, 2009; Zienkiewicz; Morgan, 2006) (Figura 29).

Figura 29 – Malha gerada na geometria



Fonte: O Autor, 2023.

Neste ponto crucial da metodologia, os detalhes específicos e as características da malha são cuidadosamente delineados. Esses parâmetros incluem, entre outras especificações, o tipo de malha (estruturada ou não estruturada), dimensões mínimas das arestas, resolução, qualidade do elemento, assimetria, condições de contorno, ortogonalidade e conformidade da malha. Cada um destes parâmetros é determinado com base nas particularidades do problema físico em questão, garantindo assim que a malha gerada seja não apenas tecnicamente precisa, mas também otimizada para

o processo de simulação a ser realizado. Esta etapa é fundamental para a obtenção de resultados de simulação confiáveis e precisos, fundamentais para a pesquisa científica. Os elementos da malha para os experimentos de boração e deboração apresentaram 49102 nós e 473954 números de elementos, pois ambos experimentos apresentaram o mesmo volume, Figura 29. A seguir são apresentados alguns aspectos da malha: qualidade dos elementos, qualidade ortogonal e assimetria, tabela.

Tabela 4 – Parâmetros da malha desenvolvida para os eventos de boração e deboração

	QUALIDADE DOS ELEMENTOS	QUALIDADE ORTOGONAL	ASSIMETRIA
MÍNIMO	$8,6094 \cdot 10^{-3}$	0,55521	$7,6954 \cdot 10^{-4}$
MÁXIMO	0,99995	1	0,69884
MÉDIA	0,65655	0,97821	0,11567
DESVIO PADRÃO	0,31048	$4,0941 \cdot 10^{-2}$	0,11964

Fonte: O Autor, 2023.

Em uma análise da malha gerada no ANSYS CFX nota-se a alta qualidade ortogonal alcançada, evidenciada por uma média de 0,97821. Este resultado sugere que a malha é bem estruturada em relação à ortogonalidade, um fator crítico para garantir a precisão nas simulações de fluidos. Embora haja alguma variação na qualidade dos elementos e na assimetria, os valores médios indicam uma boa qualidade. Portanto, a malha apresenta um desempenho robusto e serve como uma base sólida para estudos de deboração e boração.

A qualidade da malha no ANSYS CFX também está intrinsecamente associada à forma como a malha é identificada com o fluxo do fluido. Malhas definidas ao fluxo permitem uma representação mais precisa das características do fluxo, especialmente em áreas de fluxo complexo ou turbulento. A escolha do tipo de malha também pode impactar a qualidade da simulação. Malhas estruturadas são comumente usadas para simulações de fluxo em domínios simples devido à sua eficiência computacional, enquanto malhas não estruturadas permitem maior flexibilidade para modelar domínios complexos. Por fim, a malha deve ser adequada ao tipo de escoamento sendo simulado. Para simulações de escoamento transiente, a malha deve ser suficientemente refinada para capturar as variações temporais das variáveis de interesse.

3.3.2.3 Delimitação do problema - condições de contorno e iniciais

No fenômeno de diluição do boro, o comportamento transitório da concentração de boro é principalmente governado pelo efeito de mistura turbulenta. Assim, a seleção do modelo de turbulência mais apropriado e a qualidade da malha relevante para o modelo selecionado são aspectos chave para uma previsão precisa.

Foi utilizado o modelo de turbulência $k-\epsilon$ padrão. Este é um modelo de turbulência semiempírico de duas equações, sendo uma para a energia cinética da turbulência k e a outra para sua taxa de dissipação ϵ . Amplamente empregado em dinâmica dos fluidos computacional por representar uma ampla gama de escoamentos turbulentos, desde escoamentos internos até fluxos com separação e recirculação. Também apresenta limitações, podendo ser inadequado para escoamentos com rotação forte, estratificação ou em regiões próximas à parede, onde podem ser necessárias funções de amortecimento ou adaptações (Wei; Chen, 2019). No entanto, ele se comporta muito bem para o fenômeno de diluição do boro (Cho; Yoon, 2019). O fluxo foi considerado incompressível. O efeito da flutuabilidade devido à gravidade e às diferenças de densidade é levado em conta.

Em situações onde se busca simular o transporte de uma espécie no fluxo, como no caso da contaminação da água, pode ser mais adequado utilizar o modelo de Escalares Passivos em vez do complexo modelo de transporte de espécies, restrito a fluxos compressíveis. A análise de Transporte de Escalar Passivo, aplicada a fluxos de fluido incompressível, pressupõe que a espécie transportada não altera as propriedades físicas do fluxo, como densidade ou viscosidade, condição geralmente atendida quando modelamos pequenas concentrações, como o transporte de oxigênio em um fluxo de água, sem atribuir dimensões físicas às quantidades passivas (Mazaira *et al.*, 2021).

Para simulações de transporte de escalar passivo, o coeficiente de difusão dos traçadores passivos no fluido deve ser definido. Neste trabalho foi utilizado $1,5 \times 10^{-9}$ m²/s, que é característico do Cloreto de Sódio (NaCl) em água (Mazaira *et al.*, 2021; Siqueira *et al.*, 2022).

Foi utilizado o ambiente de pré-processamento do software ANSYS CFX para simular e fixar as condições de operação de cada cenário. Neste ambiente, foi definido parâmetros cruciais como a tipologia do fluido, temperatura, modelo de turbulência e condições de entrada. Nos experimentos conduzidos, foram aplicadas vazões de 10

l/h nos diâmetros de entrada e saída de 10 mm. O objetivo principal era entender como o ácido bórico se distribui dentro do pressurizador em eventos de deboração e boração, isto é, com base na concentração das entradas e as concentrações aferidas nas saídas, verificar o comportamento boração e deboração na seção de testes da bancada experimental (Bezerra; Lira; Barroso; Lima; Silva, 2013; Lira; Lima; Silva, 2023; Nascimento *et al.*, 2017; Silva, 2008).

4 REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTOS

Nesta parte será descrita como foram realizados os experimentos de deboração e de boração. Foram realizados 4 experimentos de deboração e 4 experimentos de boração, com as seguintes concentrações: 1000 ppm, 1500 ppm, 2000 ppm e 2500 ppm. Cada experimento teve a duração de 3 horas, onde buscou-se estudar a dispersão do boro no pressurizador de um SMR em escala reduzida.

4.1 EXPERIMENTOS DE DEBORAÇÃO (1000, 1500, 2000 E 2500 PPM)

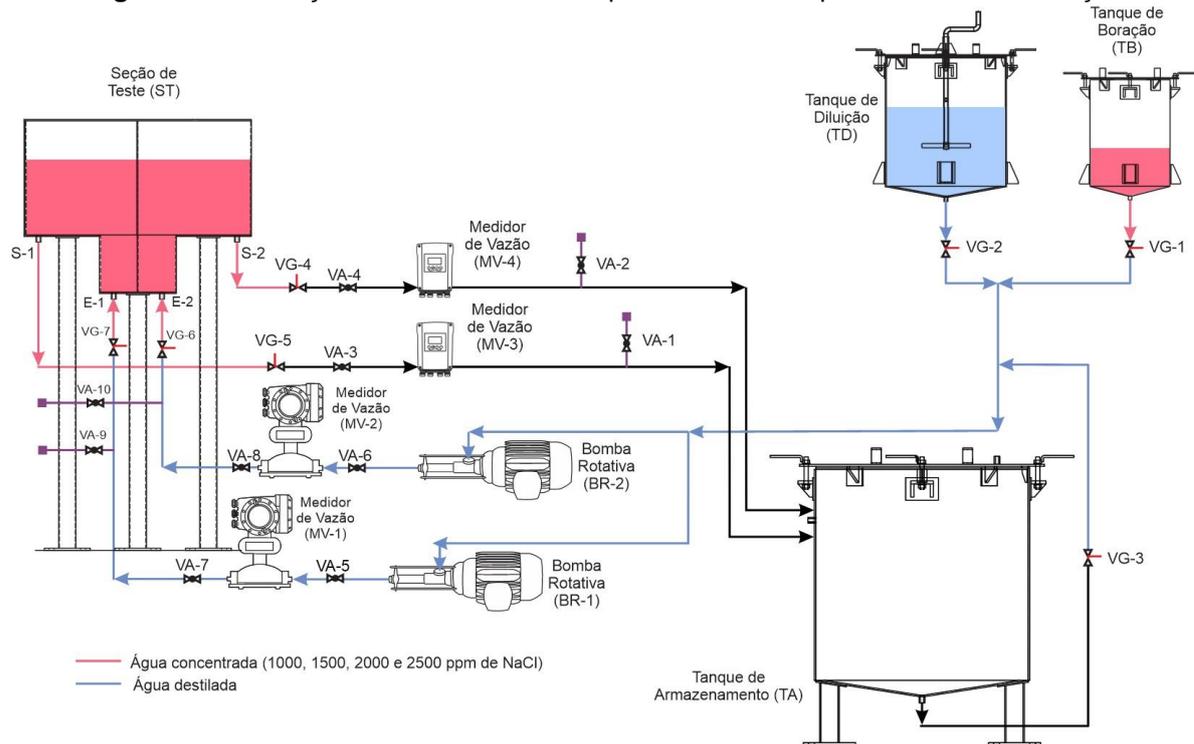
Na realização destes experimentos buscou-se reproduzir eventos de deboração na qual a seção de testes (ST) continha uma solução de NaCl nas concentrações de 1000, 1500, 2000 e 2500 ppm para cada experimento, que em seguida foi alimentada por um fluxo constante de água destilada.

Nos experimentos de deboração a condição inicial da bancada apresentava as seguintes características: ST com 60,0 litros de solução de NaCl, TD com 80,0 litros de água destilada, TB com aproximadamente 40,0 litros de solução de NaCl. As válvulas VG-2, VA-5, VA-6, VA-7 e VA-8 completamente abertas, as válvulas VA-3 e VA-4 ajustadas para vazão de 10 litros/hora, e, as demais válvulas da bancada experimental fechadas. Também, as bombas rotativas estavam com suas frequências configuradas para que no momento em que ligassem atingissem a vazão de 10 litros/hora.

A tubulação desde o TD até as válvulas de gaveta VG-6 VG-7 estava preenchida com água destilada. O sistema de aquisição de dados e os medidores de vazão foram ligados e passaram a coletar as informações da bancada experimental. As condições iniciais da bancada experimental são representadas na Figura 30.

O início dos experimentos de deboração foi dado com a abertura das válvulas gaveta VG-4 e VG-5, nas saídas S-1 e S-2, e, abertura das válvulas gaveta VG-6 e VG-7, nas entradas E-1 e E-2 da seção de teste (ST), conjuntamente com a ligação das bombas rotativas BR-1 e BR-2.

Figura 30 – Condição inicial da bancada experimental nos experimentos de debroração



Fonte: O Autor, 2023.

A vazão rapidamente foi estabilizada, devido a configuração ajustada anteriormente. Desta forma ficou garantido que no momento $t = 0$ minutos, apenas água destilada entrava na secção de teste (ST). A partir desse momento, amostras de aproximadamente 100 ml eram coletadas a cada 10 minutos nos pontos de coleta durante 180 minutos. Estas amostras depois foram analisadas e suas condutividades medidas através de condutímetro de bancada. Posteriormente, comparando com a curva de calibração, a concentração de NaCl em ppm foi estabelecida.

O estudo de debroração envolveu vários experimentos com condições iniciais distintas, conforme descrito na Tabela 5. Esta tabela retrata detalhadamente a situação inicial de cada caso, evidenciando a singularidade das concentrações iniciais em cada experimento. Esta variação garante uma amostra diversificada, contribuindo para a robustez dos dados coletados.

Tabela 5 – Condição inicial dos experimentos de deborção

EXPERIMENTOS DE DEBORAÇÃO	SEÇÃO DE TESTES (ppm)	TANQUE DE DILUIÇÃO (ppm)	TANQUE DE BORAÇÃO (ppm)
Experimento 1	1000	3	1000
Experimento 2	1500	3	1500
Experimento 3	2000	2	2000
Experimento 4	2500	3	2500

Fonte: O Autor, 2023.

As diferentes concentrações são propostas para entender os mecanismos da deborção e oferecer perspectivas relevantes sobre os resultados obtidos. A influência dessas diferenças iniciais e os efeitos decorrentes serão discutidos detalhadamente na seção de resultados e discussões.

4.2 EXPERIMENTOS DE BORAÇÃO (1000, 1500, 2000 E 2500 PPM)

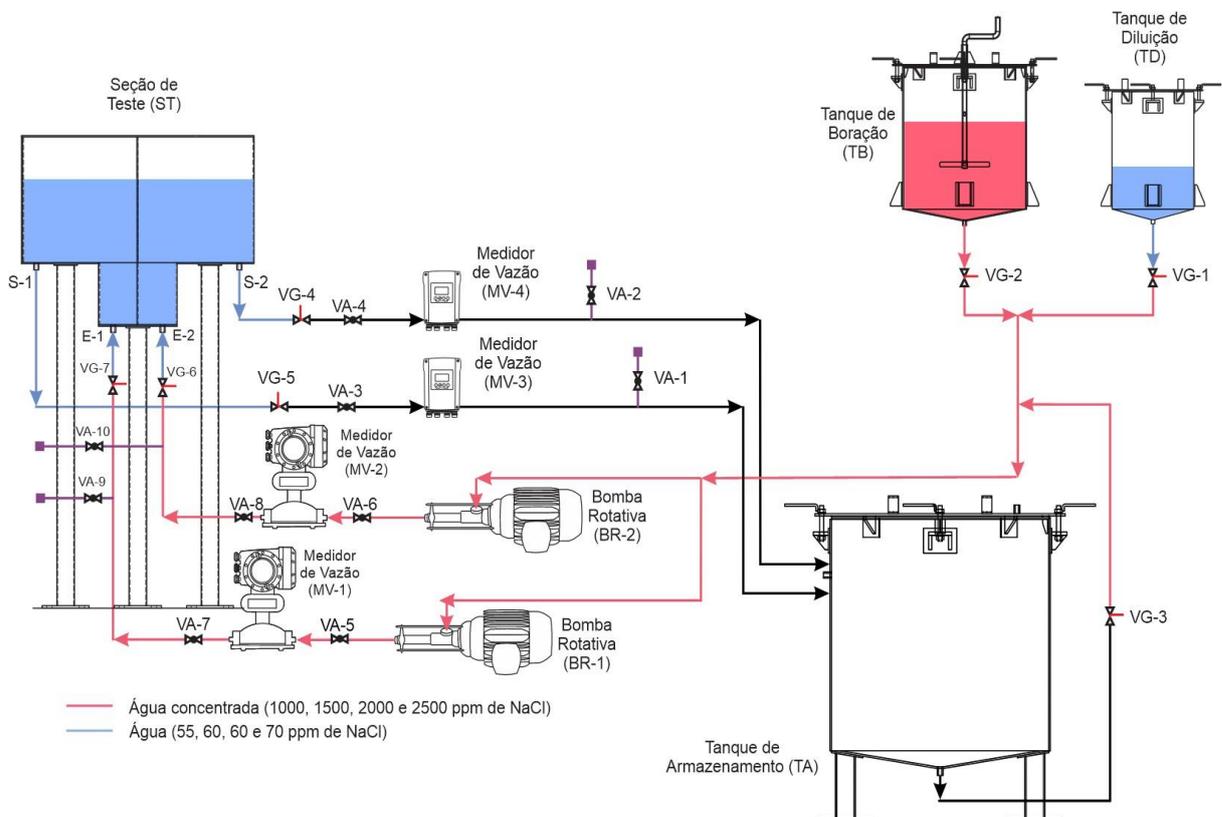
Na realização destes experimentos buscou-se reproduzir eventos de boração na qual a seção de testes (ST) continha uma solução de NaCl numa concentração média de aproximadamente 61 ppm, que em seguida seria alimentada por um fluxo constante de uma solução de NaCl numa concentração, em cada experimento, 1000, 1500, 2000 e 2500 ppm. A solução inicial de concentração média de aproximadamente 61 ppm na ST foi devido ao sensor do medidor de nível do tipo eletromagnético. Depois da calibração, o sensor considera qualquer concentração abaixo de 30 ppm como se o tubo estivesse vazio, por este motivo a solução foi prepara um pouco acima desse valor para que o medidor não apresentasse erros na leitura.

Nestes experimentos a condição inicial da bancada apresentava as seguintes características: ST com 60,0 litros de solução de NaCl com concentração média de aproximadamente 61 ppm, TD com aproximadamente 80,0 litros de solução de NaCl de acordo com cada experimento (Tabela 6), TB com aproximadamente 40,0 litros de solução de NaCl com concentração média de aproximadamente 61 ppm. As válvulas VG-2, VA-5, VA-6, VA-7 e VA-8 completamente abertas, as válvulas VA-3 e VA-4 ajustadas para vazão de 10 litros/hora, e, as demais válvulas da bancada experimental fechadas. Também, as bombas rotativas estavam com suas frequências configuradas para que no momento em que ligassem atingissem a vazão de 10 litros/hora. A

tubulação desde o TD até as válvulas de gaveta VG-6 VG-7 estava preenchida com solução de NaCl com concentração de acordo com cada experimento (Tabela 6). O sistema de aquisição de dados e os medidores de vazão foram ligados e passaram a coletar as informações da bancada experimental.

Ressalta-se que, em decorrência dos experimentos de boração, ocorreu uma alteração na nomenclatura dos Tanques de boração e de diluição. O Tanque que antes era designado para diluição, agora é identificado como Tanque de boração e o contrário também se aplica. A justificativa para essa modificação deve-se ao fato de que o reservatório, que doravante se denomina de boração, dispõe de uma capacidade de armazenamento superior. Essa maior capacidade proporciona a conveniência de preparar a solução para todo o experimento de uma única vez, eliminando a necessidade de reabastecimento de solução durante a totalidade do período experimental. As condições iniciais da bancada experimental são representadas na Figura 31.

Figura 31 – Condição inicial da bancada experimental nos experimentos de boração



Fonte: O Autor, 2023.

O início do experimento foi dado com a abertura das válvulas gaveta VG-4 e VG-5, nas saídas S-1 e S-2, e, abertura das válvulas gaveta VG-6 e VG-7, nas entradas E-1 e E-2 da seção de teste (ST), conjuntamente com a ligação das bombas rotativas BR-1 e BR-2.

A vazão rapidamente foi estabilizada, devido a configuração ajustada anteriormente. Desta forma ficou garantido que no momento $t = 0$ minutos, apenas água destilada a 3 ppm entrava na seção de teste (ST). A partir desse momento, amostras de aproximadamente 100 ml eram coletas a cada 10 minutos nos pontos de coleta durante 180 minutos. Estas amostras depois foram analisadas e suas condutividades medidas através de condutivímetro de bancada. Posteriormente, comparando com a curva de calibração, a concentração de NaCl em ppm foi estabelecida.

Os experimentos relacionados ao estudo de boração foram conduzidos sob diferentes condições iniciais, como ilustrado na Tabela 6. Esta tabela fornece uma visão detalhada das circunstâncias de partida para cada teste, destacando as particularidades nas concentrações iniciais. Estas condições assegura uma variedade na amostragem, fortalecendo a confiabilidade dos dados obtidos.

Tabela 6 – Condição inicial dos experimentos de boração

EXPERIMENTOS DE DEBORAÇÃO	SEÇÃO DE TESTES (ppm)	TANQUE DE DILUIÇÃO (ppm)	TANQUE DE BORAÇÃO (ppm)
Experimento 5	55	55	1000
Experimento 6	60	60	1500
Experimento 7	60	60	2000
Experimento 8	70	70	2500

Fonte: O Autor, 2023.

Na seção de resultados, a análise das diferenças de concentração inicial e suas consequências serão cuidadosamente abordadas. Essa investigação oferecerá uma perspectiva abrangente, facilitando a compreensão dos mecanismos associados à boração e proporcionando uma interpretação mais precisa dos resultados alcançados.

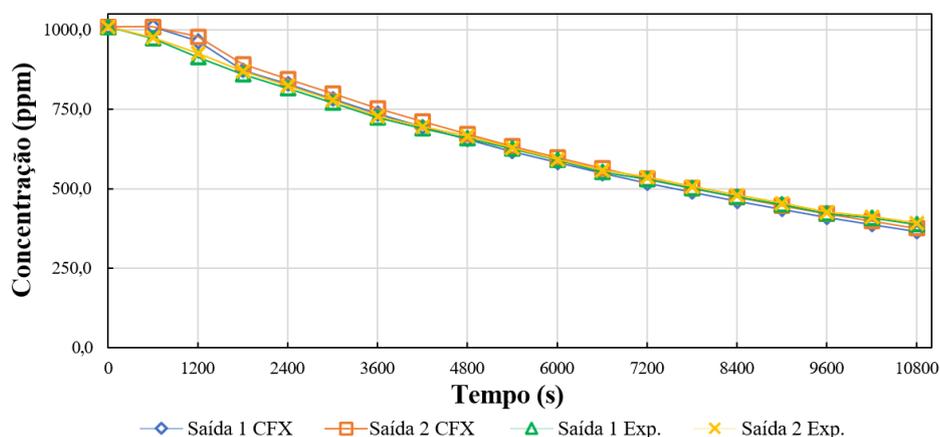
5 RESULTADO DOS EXPERIMENTOS

A seguir, estão apresentados os resultados dos cenários de deborção e boração da bancada experimental voltada para o estudo da dispersão de boro em um reator integral modular compacto. De posse das coletas realizadas e aferições da condutividade elétrica, comparada a curva calibração de concentração, são apresentadas as concentrações encontradas do NaCl ao longo do tempo durante a execução dos experimentos. Os resultados dos experimentos, de 1 ao 8, também serão mostrados com os valores previstos pela simulação computacional (CFD).

5.1 RESULTADO DOS EXPERIMENTOS DE DEBORAÇÃO (1, 2, 3 E 4)

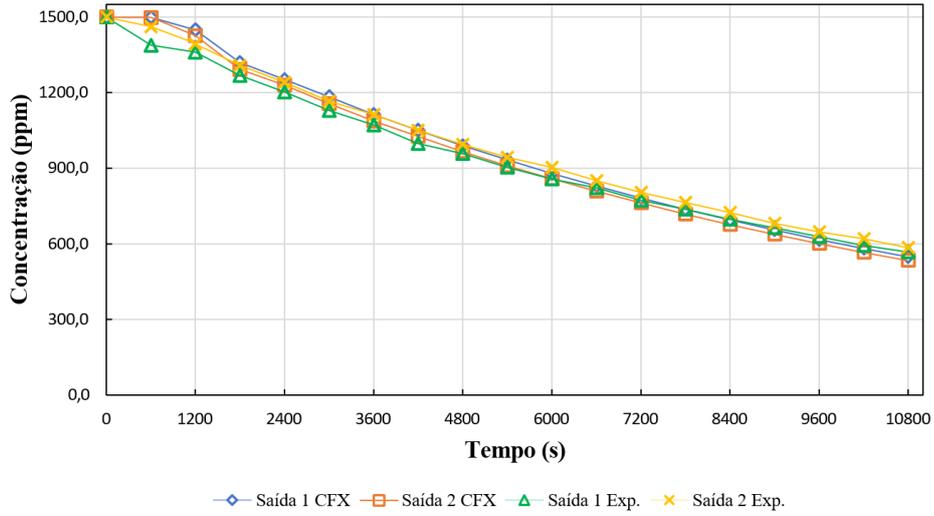
Os experimentos representaram cenários de deborção realizado na bancada experimental com a seção de teste (ST) inicialmente com um volume de 60,0 litros de água com uma determinada concentração de NaCl, conforme a Tabela 5. Os experimentos consistiram em aplicar uma vazão volumétrica constante, de 10 litros/hora de água destilada, que foi inserida nas duas entradas da ST, enquanto a mesma vazão era aplica nas saídas da ST. A concentração nas saídas da seção de teste foi determinada durante um intervalo de 180 minutos. Os valores analisados em cada experimento, considerando as médias e o desvio padrão experimental, de três leituras realizados em cada coleta nas saídas, em função do tempo são apresentados juntamente com a previsão teórica da simulação computacional executados no ANSYS CFX, Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35.

Figura 32 – Gráfico Experimento versus CFD – Deborção 1000 ppm



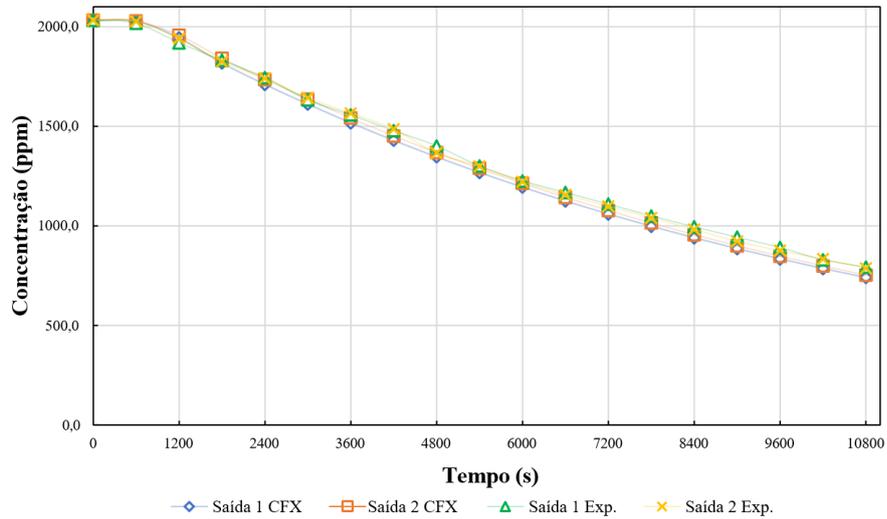
Fonte: O Autor, 2023.

Figura 33 – Gráfico Experimento versus CFD – Debroração 1500 ppm



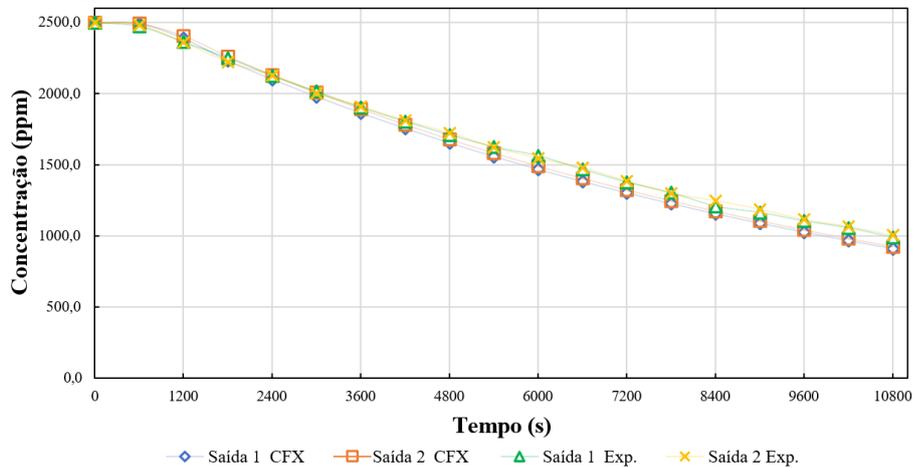
Fonte: O Autor, 2023.

Figura 34 – Gráfico Experimento versus CFD – Debroração 2000 ppm



Fonte: O Autor, 2023.

Figura 35 – Gráfico Experimento versus CFD – Debroração 2500 ppm

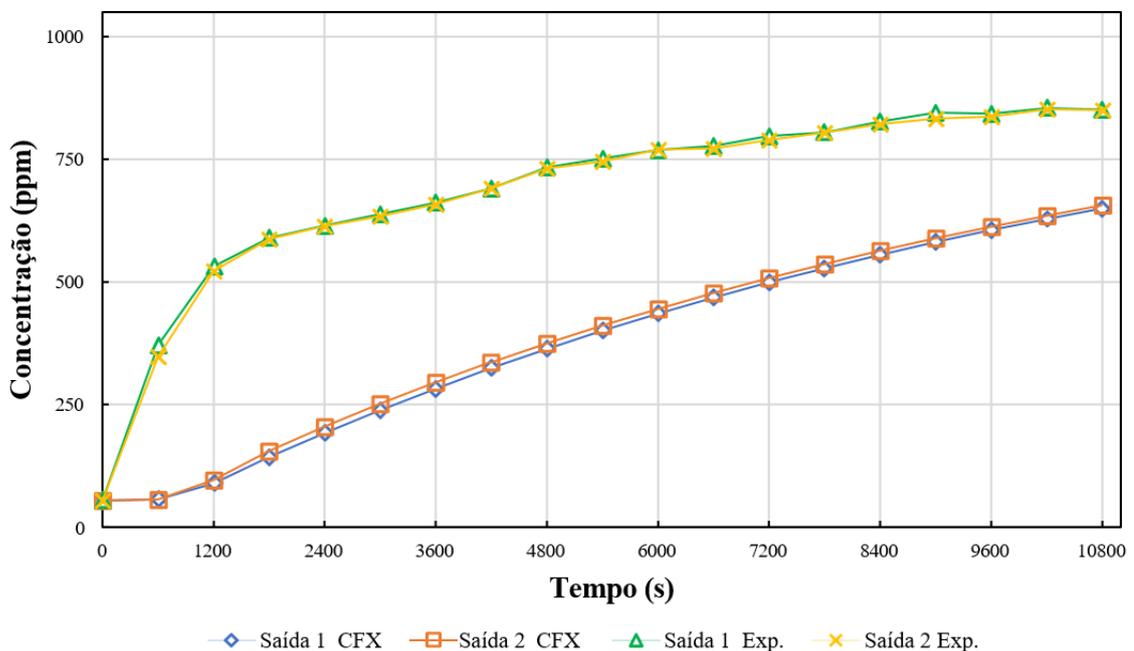


Fonte: O Autor, 2023.

5.2 RESULTADO DOS EXPERIMENTO DE BORAÇÃO (5, 6, 7 E 8)

Os experimentos representaram cenários de boração realizado na bancada experimental com a seção de teste (ST) inicialmente com um volume de 60,0 litros de água com uma determinada concentração de NaCl, conforme a Tabela 6. Os experimentos consistiram em aplicar uma vazão volumétrica constante, de 10 litros/hora de com a concentração estabelecida na Tabela 6, que foi inserida nas duas entradas da ST, enquanto a mesma vazão era aplica nas saídas da ST. A concentração nas saídas da seção de teste foi determinada durante um intervalo de 180 minutos. Os valores analisados, considerando as médias e o desvio padrão experimental, de três leituras realizados em cada coleta nas saídas, em função do tempo são apresentados juntamente com a previsão teórica da simulação computacional executados no ANSYS CFX, Figura 36, Figura 37, Figura 38 e Figura 39.

Figura 36 – Gráfico Experimento versus CFD – Boração 1000 ppm



Fonte: O Autor, 2023.

Figura 37 – Gráfico Experimento versus CFD – Boração 1500 ppm

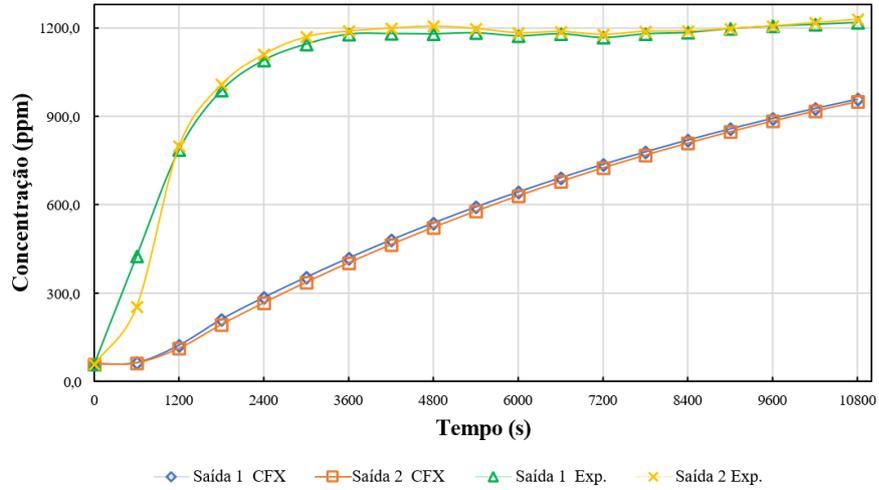


Figura 38 – Gráfico Experimento versus CFD – Boração 2000 ppm

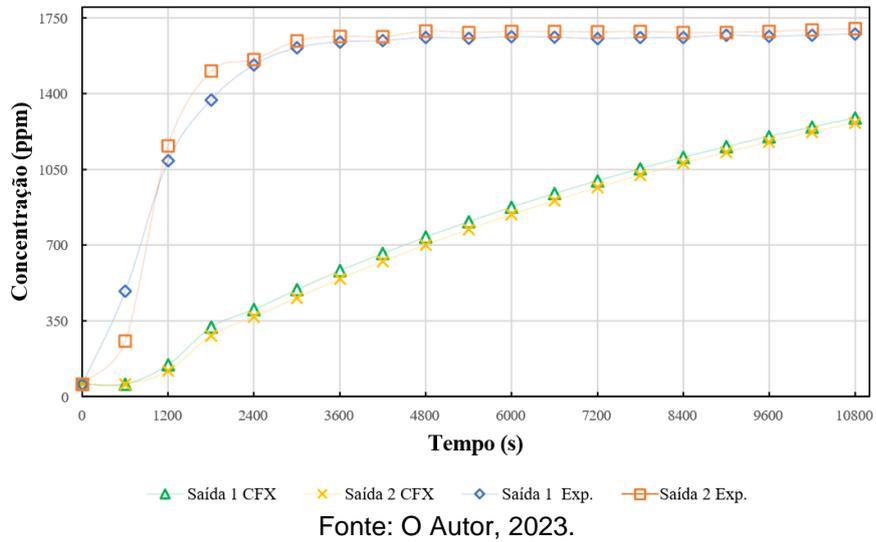
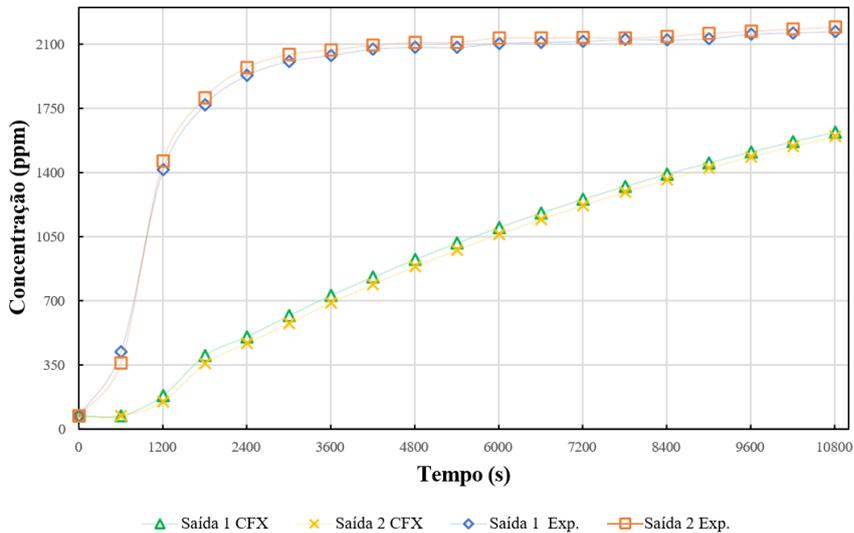


Figura 39 – Gráfico Experimento versus CFD – Boração 2500 ppm



6 ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS E CFD

A análise detalhada dos resultados dos experimentos 1, 2, 3 e 4 evidenciaram um grau considerável de correspondência entre os dados empíricos de deborção e as representações simuladas por computador. O que demonstra uma congruência e coerência robusta dos conjuntos de dados das simulações computacionais, utilizando a plataforma ANSYS CFX, para explorar e modelar os eventos de deborção. A ferramenta ANSYS CFX, com sua reputação estabelecida em análises de fluidos computacionais, apresentou um nível de precisão que reforça a utilidade dessas simulações na pesquisa científica.

Passando a uma análise dos desvios entre as medições experimentais e a simulação, o estudo observou as seguintes diferenças máximas: Para o evento de deborção com uma concentração de 1000 ppm, a simulação apresentou um desvio máximo de 7%. Enquanto isso, uma diferença de 9% foi identificada ao comparar a simulação com o evento de deborção de 1500 ppm. Aumentando a concentração para 2000 ppm, a discrepância foi novamente de 7%. Finalmente, a simulação mostrou um desvio de 9% ao ser comparada com o evento de deborção de 2500 ppm. A compilação dessas divergências máximas na Tabela 7 mostra uma visualização clara e eficiente do grau de aderência entre a simulação computacional e os eventos experimentais.

A análise das diferenças médias entre os dados experimentais e os resultados da simulação mostra uma boa concordância do modelo, especialmente no cenário de 1000 ppm, com uma variação média entre -2% e 2%. Em cenários de concentrações mais elevadas, as diferenças médias variam de -3% a -4%, indicando um leve desvio sistemático do modelo em condições mais concentradas. Apesar desses desvios, as diferenças médias são pequenas e o modelo oferece uma representação satisfatória dos eventos experimentais. A discussão desses resultados, por sua vez, é crucial para o entendimento e aprimoramento das simulações futuras, contribuindo para a validação do modelo de deborção.

Ao avaliar as diferenças médias entre os dados experimentais e os resultados da simulação, percebe-se uma boa concordância do modelo, especialmente no cenário de 1000 ppm, com uma variação média entre -2% e 2%. Nos cenários de concentrações mais elevadas, as diferenças médias variam de -3% a -4%, sinalizando um leve desvio sistemático do modelo em condições mais concentradas. É importante

salientar que, apesar desses desvios, eles são considerados aceitáveis, pois até mesmo o experimento em si possui suas incertezas e variações.

Além disso, as diferenças médias são relativamente pequenas e o modelo oferece uma representação satisfatória dos eventos experimentais.

As causas desses desvios podem estar ligadas a várias fontes, como imprecisões no modelo de turbulência, aproximações na geometria da simulação ou mesmo nas condições de contorno. A identificação precisa da causa desses desvios pode auxiliar na otimização das simulações futuras. Esta análise crítica dos resultados é essencial para o entendimento e aprimoramento contínuo das simulações, fornecendo diretrizes valiosas para futuros trabalhos e reforçando a validação do modelo de deborçamento.

Tabela 7 – Diferenças percentuais entre os dados dos experimentos de deborçamento e a simulação computacional

Tempo (s)	1000 ppm		1500 ppm		2000 ppm		2500 ppm	
	Diferenças		Diferenças		Diferenças		Diferenças	
	Saída 1	Saída 2	Saída 1	Saída 2	Saída 1	Saída 2	Saída 1	Saída 2
0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
600	0%	4%	8%	3%	1%	0%	1%	0%
1200	-1%	7%	6%	2%	1%	1%	1%	2%
1800	-2%	4%	4%	-1%	-1%	1%	-1%	2%
2400	-2%	4%	4%	-1%	-2%	0%	-1%	0%
3000	-2%	4%	5%	-1%	-1%	0%	-2%	0%
3600	-2%	4%	4%	-2%	-3%	-2%	-2%	-1%
4200	-2%	3%	5%	-2%	-3%	-2%	-3%	-2%
4800	-3%	2%	3%	-3%	-4%	0%	-3%	-3%
5400	-3%	1%	3%	-3%	-2%	-1%	-4%	-3%
6000	-3%	1%	3%	-5%	-3%	-1%	-6%	-4%
6600	-3%	2%	1%	-5%	-4%	-1%	-6%	-5%
7200	-3%	1%	1%	-5%	-4%	-2%	-6%	-5%
7800	-3%	0%	0%	-6%	-5%	-3%	-6%	-4%
8400	-3%	0%	0%	-6%	-5%	-3%	-4%	-6%
9000	-3%	-1%	-1%	-6%	-6%	-2%	-7%	-7%
9600	-3%	0%	-2%	-7%	-6%	-3%	-7%	-7%
10200	-3%	-2%	-2%	-9%	-5%	-4%	-9%	-8%
10800	-3%	-3%	-3%	-9%	-7%	-4%	-8%	-8%
Diferença Média	-2%	2%	2%	-4%	-3%	-1%	-4%	-3%

Fonte: O Autor, 2023

No decorrer da análise dos resultados provenientes dos experimentos 5, 6, 7 e 8, identificou-se uma compatibilidade expressiva entre os parâmetros da simulação computacional e os dados adquiridos durante o evento de boração. Essa correlação significativa endossa a robustez do modelo computacional adotado. No entanto, uma avaliação mais minuciosa do experimento, levando em conta a dinâmica de alteração

da concentração ao longo do tempo, revelou diferenças significativas que não podem ser negligenciadas. A observação dessas discrepâncias sublinha a complexidade inerente aos sistemas físicos reais, que podem apresentar comportamentos que desafiam a reprodução através de modelos computacionais, ou, alternativamente, apontam para a necessidade de aperfeiçoamento do modelo de simulação.

Ao se confrontar os dados obtidos experimentalmente com a simulação no software ANSYS CFX, foram percebidas divergências numéricas nos resultados. Foi registrada uma variação máxima de 85% no evento de boração de 1000 ppm, variação máxima de 86% no evento de boração de 1500 ppm. Aumentando a concentração para 2000 ppm, a discrepância aumentou para 90% e uma discrepância similar, também de 90%, no caso do evento de boração de 2500 ppm, como evidenciado na Tabela 8.

Tabela 8 – Diferenças percentuais entre os dados dos experimentos de boração e a simulação computacional

Tempo (s)	1000 ppm		1500 ppm		2000 ppm		2500 ppm	
	Diferenças		Diferenças		Diferenças		Diferenças	
	Saída 1	Saída 2	Saída 1	Saída 2	Saída 1	Saída 2	Saída 1	Saída 2
0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
600	-85%	-83%	-85%	-75%	-88%	-78%	-83%	-80%
1200	-83%	-81%	-84%	-86%	-87%	-90%	-87%	-90%
1800	-76%	-73%	-79%	-81%	-77%	-81%	-77%	-80%
2400	-69%	-67%	-74%	-76%	-74%	-76%	-74%	-76%
3000	-63%	-60%	-69%	-71%	-69%	-72%	-69%	-72%
3600	-57%	-55%	-64%	-66%	-64%	-67%	-64%	-67%
4200	-53%	-51%	-59%	-61%	-60%	-62%	-60%	-62%
4800	-50%	-49%	-54%	-57%	-56%	-59%	-56%	-58%
5400	-47%	-45%	-50%	-52%	-51%	-54%	-51%	-54%
6000	-43%	-42%	-45%	-47%	-47%	-50%	-48%	-50%
6600	-40%	-38%	-41%	-43%	-44%	-46%	-44%	-46%
7200	-37%	-36%	-37%	-38%	-40%	-43%	-41%	-43%
7800	-34%	-33%	-34%	-35%	-37%	-39%	-38%	-39%
8400	-33%	-31%	-31%	-32%	-33%	-36%	-35%	-36%
9000	-31%	-29%	-28%	-29%	-31%	-33%	-32%	-34%
9600	-28%	-27%	-26%	-27%	-28%	-30%	-30%	-32%
10200	-26%	-26%	-24%	-25%	-25%	-28%	-27%	-29%
10800	-24%	-23%	-21%	-23%	-23%	-26%	-25%	-27%
Diferença Média	-46%	-45%	-48%	-49%	49%	51%	49%	51%

Fonte: O Autor, 2023

Ainda com base na Tabela 8 fornecida, as diferenças médias entre as saídas 1 e 2 para diferentes concentrações de boração (1000 ppm, 1500 ppm, 2000 ppm e 2500 ppm) são relativamente altas. Para 1000 ppm e 1500 ppm, as diferenças médias foram de 46% e 48% respectivamente. As divergências se acentuam ainda mais para

concentrações mais elevadas, alcançando uma diferença média de 49% e 51% para 2000 ppm e 2500 ppm, respectivamente. Essas divergências quantificáveis reforçam a importância da validação prática das previsões oferecidas pelas simulações e instigam reflexões acerca das possíveis melhorias a serem implementadas nos modelos de simulação. Tais divergências podem ser fruto de alguns fatores como as propriedades físico-químicas do NaCl, como por exemplo a solvatação, densidades das concentrações e coeficiente de solubilidade.

Outro aspecto que pode ter contribuído é o modelo hidrodinâmico que pode não estar captando completamente a complexidade do sistema, incluindo efeitos como turbulência e padrões de fluxo que podem ser muito diferentes em sistemas reais. Também as condições iniciais e de contorno que estão sendo consideradas no modelo computacional. Logicamente, e que não deve ser descartado, a dinâmica temporal do experimento e da simulação pode não estar perfeitamente alinhada, o que pode explicar as variações ao longo do tempo.

Ainda assim, é interessante notar que os experimentos de boração com concentrações de 2000 e 2500 ppm corroboram a tendência apresentada na curva de boração dos eventos de 1000 e 1500 ppm. Este achado reforça a consistência dos dados coletados e a reprodutibilidade do processo, apesar das variações observadas em comparação com o modelo computacional.

7 CONCLUSÕES

A tese conduziu uma série de experimentos de deborção e boração em um pressurizador de um SMR em escala reduzida, em paralelo com simulações computacionais por meio da plataforma ANSYS CFX. Com o objetivo de avaliar a aderência dos resultados simulados em relação aos dados empíricos, e dessa forma avaliar a eficiência da plataforma na modelagem desses eventos complexos.

Os resultados dos experimentos de 1 a 4 apresentaram uma correspondência notável com as simulações computacionais, com divergências máximas variando de 7% a 9% na deborção em diferentes concentrações (1000, 1500, 2000, 2500 ppm). Este fato concretiza a concordância das simulações computacionais realizadas usando o ANSYS CFX, na modelagem dos eventos de deborção, ratificando sua utilidade na pesquisa científica.

Contudo, os experimentos de 5 a 8 revelaram divergências expressivas entre os parâmetros da simulação computacional e os dados adquiridos durante os eventos de boração. As diferenças chegaram a ser de 90%, levando a uma reflexão sobre as possíveis melhorias necessárias nos modelos de simulação. Uma possível justificativa para essa discrepância pode residir na natureza mais complexa dos processos de boração, que podem envolver variáveis adicionais ou fenômenos não totalmente contemplados no modelo de simulação atual. Também é válido considerar que a configuração do modelo ou os parâmetros utilizados para boração podem necessitar de ajustes específicos para refletir com precisão os eventos reais.

Essas divergências sublinham a complexidade inerente aos sistemas físicos reais, que frequentemente apresentam comportamentos desafiantes à reprodução por meio de modelos computacionais. Além disso, salienta-se a importância de contínuas validações práticas das previsões oferecidas pelas simulações, para garantir a confiabilidade e a precisão dos modelos utilizados.

Conclui-se que, apesar das discrepâncias observadas, a simulação computacional através do uso do ANSYS CFX, desempenha um papel crucial na modelagem de eventos de deborção e boração. A consistência observada nos dados coletados e a reprodutibilidade do processo sugerem que esta plataforma é uma ferramenta valiosa. No entanto, é imperativo que as próximas pesquisas realizadas permaneçam conscientes de suas limitações e continuem a aperfeiçoar os modelos de simulação em resposta aos resultados observados em experimentos práticos.

Dando continuidade à essa reflexão, e considerando as restrições apontadas, é importante enfatizar que, mesmo com a eficácia demonstrada pelo ANSYS CFX em simulações, o software apresenta desafios ao replicar fenômenos tão complexos como deborção e boração em certas situações.

Para os trabalhos futuros, sugere-se:

- Utilização de outros modelos de turbulência: Dado que os experimentos de 5 a 8 apresentaram divergências expressivas, um estudo mais aprofundado sobre diferentes modelos de turbulência pode ser benéfico.
- Incorporação de mais variáveis: A complexidade dos sistemas pode ser melhor entendida incluindo mais variáveis no modelo, como variação de temperatura, diferentes densidades entre líquidos, solvatação do elemento traço, entre outros.
- Estudos sobre condições iniciais e de contorno: Como as simulações são sensíveis a estas condições, um estudo detalhado pode ajudar a otimizar as simulações.
- Interação com outras plataformas: Embora o ANSYS CFX tenha sido utilizado, a comparação com outros softwares de CFD, como ANSYS Fluent, pode proporcionar uma melhor compreensão sobre a robustez dos modelos em diferentes plataformas.

Ainda, para parte experimental, uma vez que os dados de concentração foram obtidos nas entradas e saídas, sugere-se um monitoramento interno a ST com sensores espalhados de forma tridimensional para captar o comportamento espacial e temporal da pluma de dispersão. Uma análise nesse sentido pode responder o comportamento e refinar modelo na previsão dos eventos de boração.

Assim, este trabalho contribui para a literatura científica em duas frentes: ao fornecer novos dados empíricos em eventos de deborção e boração e ao examinar de forma detalhada o desempenho do ANSYS CFX na simulação desses eventos. Essas descobertas sinalizam caminhos para pesquisas futuras que podem focar no aprimoramento das simulações computacionais e na validação desses modelos em uma gama ainda maior de cenários experimentais.

REFERÊNCIAS

ABDALLAH, Abdallah M.; MARIY, Ahmed H.; RABIE, Mohammad A.; NAGY, Mohammad E. S. Pressurizer transients dynamic model. **Nuclear Engineering and Design**, [S. l.], v. 73, n. 3, p. 447–453, 1982. DOI: 10.1016/0029-5493(82)90018-8. Acesso em: 20 set. 2023.

ABRAM, Tim; ION, Sue. Generation-IV nuclear power: A review of the state of the science. **Energy Policy**, [S. l.], v. 36, n. 12, p. 4323–4330, 2008. DOI: 10.1016/J.ENPOL.2008.09.059. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421508004448>. Acesso em: 13 dez. 2017.

AL-AGELE, Hadi A.; JASHAMI, Hisham; HIGGINS, Chad W. Evaluation of novel ultrasonic sensor actuated nozzle in center pivot irrigation systems. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 262, p. 107436, 2022. DOI: 10.1016/J.AGWAT.2021.107436. Acesso em: 27 set. 2023.

ALENCAR DE SÁ MAGALHÃES, Mardson; BRAYNER DE OLIVEIRA LIRA, Carlos Alberto; BEZERRA DA SILVA, Mário Augusto; DE LIMA BEZERRA, Jair; DE ANDRADE LIMA, Fernando Roberto. Boron transient effects on the behavior of IRIS reactor using dynamic modeling. **Progress in Nuclear Energy**, [S. l.], v. 69, p. 44–52, 2013. DOI: 10.1016/j.pnucene.2013.05.006.

Ansys CFX. 2023. Disponível em: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>. Acesso em: 3 maio. 2023.

ARDUINO. **Software | arduino**. 2023. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/software>. Acesso em: 8 maio. 2023.

ATKINS, Peter; JONES, Loreta; LAVERMAN, Leroy. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 7a Edição ed. [s.l.] : Grupo A, 2018.

BANERJEE, Partha Sarathi; KARMAKAR, Amiya; DHARA, Mainak; GANGULY, Kaustabh; SARKAR, Sayani. A novel method for predicting bradycardia and atrial fibrillation using fuzzy logic and arduino supported IoT sensors. **Medicine in Novel Technology and Devices**, [S. l.], v. 10, p. 100058, 2021. DOI: 10.1016/J.MEDNTD.2021.100058. Acesso em: 1 de maio. 2023.

BARRAGÁN, Hernando. **The Untold History of Arduino**. 2022. Disponível em: <https://arduinhistory.github.io/>. Acesso em: 4 maio. 2023.

BEZERRA, Jair De Lima; LIRA, Carlos Alberto Brayner De Oliveira; BARROSO, Antonio Carlos De Oliveira; LIMA, Fernando Roberto De Andrade; SILVA, Mário Augusto Bezerra Da. Study of the boron homogenizing process employing an experimental low-pressure bench simulating the IRIS reactor pressurizer - Part I. **Annals of Nuclear Energy**, [S. l.], v. 62, p. 558–563, 2012. DOI: 10.1016/j.anucene.2013.02.028. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2012.10.005>.

BEZERRA, Jair De Lima; LIRA, Carlos Alberto Brayner De Oliveira; BARROSO, Antonio Carlos De Oliveira; LIMA, Fernando Roberto De Andrade; SILVA, Mário Augusto Bezerra Da. Study of the boron homogenizing process employing an experimental low-pressure bench simulating the IRIS reactor pressurizer - Part II. **Annals of Nuclear Energy**, [S. l.], v. 62, p. 558–563, 2013. DOI: 10.1016/j.anucene.2013.02.028.

BHAMRE, Harshwardhan; DESHMUKH, Shubham; SHINTRE, Hrishikesh; GHODKE, Piyush; SHINDE, Shriyash. Design and development of bottle sorting machine using Arduino. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 77, p. 1023–1027, 2023. DOI: 10.1016/J.MATPR.2023.02.252. Acesso em: 5 maio. 2023.

BHOWMIK, Palash K.; ORMISTON, Scott J.; SCHLEGEL, Joshua P.; CHOWDHURY,

Debasish. State-of-the-art and review of condensation heat transfer for small modular reactor passive safety: Computational studies. *Nuclear Engineering and Design* Elsevier Ltd, , 2023. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2023.112366.

BROWN, D. H. Transient thermodynamic of reactors and process apparatus. Em: ASME PAPER 57-NESC-81, SECOND NUCLEAR ENGINEERING AND SCIENCE CONFERENCE 1957, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] Disponível em: https://scholar.google.com/scholar?q=Brown%2C%20D.H.%2C%201957.%20Transient%20thermodynamics%20of%20reactor%20and%20process%20apparatus.%20In%3A%20Proc.%20Second%20Nucl.%20Eng.%20Conf.%2C%20Vol%20II.#d=gs_cit&t=1694698089203&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3Aso7k3Y9O4yoJ%3Ascholar.google.com%2F%26output%3Dcite%26scirp%3D0%26hl%3Dpt-BR Acesso em: 13 set. 2023.

BROWN, Paul. **Is There a New Nuclear Kid on the Block?** 2014. Disponível em: <https://www.scientificamerican.com/article/is-there-a-new-nuclear-kid-on-the-block/#>. Acesso em: 6 jan. 2018.

BRUEL, R. N. **Análise de sensibilidade de um modelo teórico do pressurizador.** São Paulo I PEN - USP, , 1997. Disponível em: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/40/102/40102061.pdf>. Acesso em: 11 set. 2023.

BUCKINGHAM, Sophia; PLANQUART, Philippe; EBOLI, Marica; MOREAU, Vincent; VAN TICHELEN, Katrien. Simulation of fuel dispersion in the MYRRHA-FASTEF primary coolant with CFD and SIMMER-IV. **Nuclear Engineering and Design**, [S. l.], v. 295, p. 74– 83, 2015. DOI: 10.1016/J.NUCENGDES.2015.08.018. Acesso em: 3 maio. 2023.

CARELLI, Mario D. *et al.* The design and safety features of the IRIS reactor. **Nuclear Engineering and Design**, [S. l.], v. 230, n. 1–3, p. 151–167, 2004. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2003.11.022.

CHO, Yun Je; YOON, Han Young. Numerical analysis of the ROCOM boron dilution benchmark experiment using the CUPID code. **Nuclear Engineering and Design**, [S. l.], v. 341, p. 167–175, 2019. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2018.11.005.

CHRISTY, PT; GALAN, VJ. POWER TRAIN: general hybrid simulation for reactor coolant and secondary system transient response. **Nuclear Power Generation** Div.Lynchburg, Va.(USA)Babcock and Wilcox Co., , 1973. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/4435765>. Acesso em: 13 set. 2023.

COLOMBO, Marco *et al.* CFD model development for two-phase flows. **Advances of Computational Fluid Dynamics in Nuclear Reactor Design and Safety Assessment**, [S. l.], p. 239–335, 2019. DOI: 10.1016/B978-0-08-102337-2.00003-1. Acesso em: 3 maio. 2023.

COSTA, Fabio. **História do Arduino**: como surgiu e quem criou esta incrível plataforma. 2017. Disponível em: <https://fabiocosta.net/arduino/historia-do-arduino/>. Acesso em: 5 maio. 2023.

DEBNATH, Debika; BAIDYA, Bibek; GHOSH, Shubhrajit. Performance analysis of Arduino processor based hybrid power generation system (HPGS). **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 72, p. 3023–3028, 2023. DOI: 10.1016/J.MATPR.2022.08.375. Acesso em: 5 maio. 2023.

DURY, T. V.; HEMSTRÖM, B.; SHEPEL, S. V. CFD simulation of the Vattenfall 1/5th-scale PWR model for boron dilution studies. **Nuclear Engineering and Design**, [S. l.], v. 238, n. 3, p. 577–589, 2008. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.02.038.

ELETROGATE. **Uno R3 SMD CH340** - Eletrogate | Arduino, Robótica, IoT, Apostilas e Kits. 2023. Disponível em: https://www.eletrogate.com/unor3smdch340?utm_source=Site&utm_medium=GoogleMerchant&utm_campaign=GoogleMerchant&gad=1&gclid=CjwKCAjw6vviBhB_EiwAQJRoph1dcz9LFnHUPHhtLNRiaHILYIaX3IcKTbwXkcGU0Lg1ToydCI6h3hoCIIAQA_vD_BwE. Acesso em: 12 maio. 2023.

ELETRONUCLEAR, Eletrobras. **Panorama da Energia Nuclear no Mundo Edição de 2016**. 2016. Disponível em: http://www.eletronuclear.gov.br/LinkClick.aspx?fileticket=SG_9CnL80wM%3D&tabid=406 . Acesso em: 6 jan. 2018.

ELTAYEB, Abdelgadir; TAN, Sichao; QI, Zhang; ALA, Ayodeji A.; AHMED, Nisrene M. PLIF experimental validation of a FLUENT CFD model of a coolant mixing in reactor vessel down-comer. **Annals of Nuclear Energy**, [S. l.], v. 128, p. 190–202, 2019. DOI: 10.1016/J.ANUCENE.2018.12.051. Acesso em: 20 maio. 2023.

FILHO, Avelino A. Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE - Análise Dinâmica. [s.l.] : Editora Saraiva, 2009. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536519715/pageid/0>. Acesso em: 27 ago. 2023.

FREIXA, J.; REVENTÓS, F.; PRETEL, C.; BATET, L.; SOL, I. SBLOCA with boron dilution in pressurized water reactors. Impact on operation and safety. **Nuclear Engineering and Design**, [S. l.], v. 239, n. 4, p. 749–760, 2009. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2009.01.004.

GAJEWSKI, W. M. Study-by Simulator Techniques-of Transient Pressures in High Pressure Water Systems Utilizing a Surge Tank. Westinghouse Electric Corporation

Pittsburgh, Pennsylvania U.S. Atomic Energy Commission, Technical Information Service Extension, 1955. Disponível em: https://play.google.com/store/books/details/W_M_Gajewski_Study_by_Simulator_Technique%20s_of_Tran?id=Hpktazf4DMC. Acesso em: 13 set. 2023.

GOLDBERG, Stephen M.; ROSNER, Robert. **Nuclear Reactors: Generation to Generation**. [s.l.: s.n.].

GRAHN, A.; PESCADOR, E. Diaz; KLIEM, S.; SCHÄFER, F.; HÖHNE, T. Modelling of complex boron dilution transients in PWRs—Validation of CFD simulation with ANSYS CFX against the ROCOM E2.3 experiment. *Nuclear Engineering and Design*, [S. l.], v. 372, p. 110938, 2021. DOI: 10.1016/J.NUCENGDES.2020.110938. Acesso em: 3 maio. 2023.

HERTLEIN, Roland J.; UMMINGER, Klaus; KLIEM, Sören; PRASSER, Horst-Michael; HÖHNE, Thomas; WEISS, Frank-Peter. Experimental and Numerical Investigation of Boron Dilution Transients in Pressurized Water Reactors. **Nuclear Technology**, [S. l.], v. 141, n. 1, p. 88–107, 2003. DOI: 10.13182/NT03-A3353. Disponível em: <https://doi.org/10.13182/NT03-A3353>.

HÖHNE, Thomas; KLIEM, Sören; ROHDE, Ulrich; WEISS, Frank-Peter. Boron dilution transients during natural circulation flow in PWR—Experiments and CFD simulations. **Nuclear Engineering and Design**, [S. l.], v. 238, n. 8, p. 1987–1995, 2008. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.10.032. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549308000253>.

HUANG, Tai Ting; WANG, Cheng Yen; YUANN, Yng Ruey. Calculation of boron concentration dependent reactivity versus moderator density curve with application on ATWS analysis for Maanshan PWR plant. **Nuclear Engineering and Design**, [S. l.], v. 411, 2023. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2023.112438.

IAEA. **ADVANCES IN SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY DEVELOPMENTS 2020** Edition A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://aris.iaea.org>.

IAEA. **Nuclear Technology Review 2022**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc66-inf4.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2023a.

IAEA. **Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A** Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2022 Edition. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://aris.iaea.org>.

IAEA, International Atomic Energy Agency. **Nuclear Technology Review 2017**. 2017. Disponível em: https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC61/GC61InfDocuments/English/gc61inf-4_en.pdf. Acesso em: 9 dez. 2017.

KHATRY, Jivan; AYDOGAN, Fatih. Design basis accident analysis of a small modular reactor. **Journal of Thermal Engineering**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 1241–1258, 2017. DOI: 10.18186/journal-of-thermal-engineering.323390.

KIGER, K. T.; GAVELLI, F. Boron mixing in complex geometries: Flow structure details. **Nuclear Engineering and Design**, [S. l.], v. 208, n. 1, p. 67–85, 2001. DOI: 10.1016/S0029-5493(01)00349-1.

KLIEM, S.; SÜHNEL, T.; ROHDE, U.; HÖHNE, T.; PRASSER, H. M.; WEISS, F. P. Experiments at the mixing test facility ROCOM for benchmarking of CFD codes. **Nuclear Engineering and Design**, [S. l.], v. 238, n. 3, p. 566–576, 2008. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.02.053.

KRHONE. **OPTIMASS 3000 OPTIMASS 3000 OPTIMASS 3000 OPTIMASS 3000 Technical Datasheet Sensor for mass flow** • First choice for low flow applications • Certified secondary pressure containment • A common footprint for all three sizes, in Hastelloy® or Stainless Steel. Germany. Disponível em: www.krohne.com.

LAMARSH, Jonh R.; BARATTA, Antony J. **Introduction to Nuclear Engineering**. 3. ed. [s.l.] : Printice Hall, 2001. a. DOI: 10.1119/1.1933896. Disponível em: <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.1933896>.

LAMARSH, Jonh R.; BARATTA, Antony J. **Introduction to Nuclear Engineering**. 3. ed. [s.l.] : Printice Hall, 2001. b. DOI: 10.1119/1.1933896. Disponível em: <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.1933896>.

LI, Xing; QI, Peiyao; ZHAO, Tingjie; QIAO, Shouxu; TAN, Sichao. LIF study of temporal and spatial fluid mixing in an annular downcomer. **Annals of Nuclear Energy**, [S. l.], v. 126, p. 220–232, 2019. DOI: 10.1016/j.anucene.2018.11.006.

LIRA, Carlos Alberto Brayner de Oliveira; LIMA, Fernando Roberto de Andrade; SILVA, Mário Augusto Bezerra Da. Causative process related method for the design of a reduced scale test facility for boron dispersion analysis in the pressurizer of SMRs. **Progress in Nuclear Energy**, [S. l.], v. 157, p. 104569, 2023. a. DOI: 10.1016/J.PNUCENE.2023.104569. Acesso em: 2 abr. 2023.

LIRA, Carlos Alberto Brayner de Oliveira; LIMA, Fernando Roberto de Andrade; SILVA, Mário Augusto Bezerra Da. Causative process related method for the design of a reduced scale test facility for boron dispersion analysis in the pressurizer of SMRs. **Progress in Nuclear Energy**, [S. l.], v. 157, p. 104569, 2023. DOI: 10.1016/J.PNUCENE.2023.104569. Acesso em: 2 abr. 2023.

LOCATELLI, Giorgio; BINGHAM, Chris; MANCINI, Mauro. Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects. **Progress in Nuclear Energy**, [S. l.], v. 73, p. 75–85, 2014. DOI: 10.1016/j.pnucene.2014.01.010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.01.010>.

LOCATELLI, Giorgio; MANCINI, Mauro; TODESCHINI, Nicola. Generation IV nuclear reactors: Current status and future prospects. *Energy Policy*, [S. l.], v. 61, p. 1503–1520, 2013. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.06.101.

MAGALHÃES, Mardson A. S.; LIRA, Carlos A. B. O.; SILVA, Mário A. B.; BEZERRA, Jair L.; LIMA, Fernando R. A. Boron transient effects on the behavior of IRIS reactor using dynamic modeling. **Progress in Nuclear Energy**, [S. l.], v. 69, p. 44–52, 2013. DOI: 10.1016/j.pnucene.2013.05.006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2013.05.006>.

MAGALHÃES, MAS. **Efeitos de transitórios de boro no comportamento do reator iris através de modelagem dinâmica com simulink**. [S. l.], 2010. Disponível em: <http://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/9361>. Acesso em: 25 jun. 2017.

MAZAIRA, Leorlen Y. Rojas *et al.* Computational simulation of a test facility in reduced scale for analysis of boron dispersion in a pressurizer of an integral compact and modular reactor. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, [S. l.], v. 8, n. 3A, 2021. DOI: 10.15392/bjrs.v8i3A.1535.

MICHAELIDES, Efstathios E.; MICHAELIDES, Dimitrios N. Impact of nuclear energy on fossil fuel substitution. **Nuclear Engineering and Design**, [S. l.], v. 366, 2020. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2020.110742.

MIRÓ, R.; BARRACHINA, T.; ABARCA, A.; VERDÚ, G.; PEREIRA, C.; MARTÍNEZ-MURILLO, J. C. Implementation of control rod movement and boron injection options by using control variables in RELAP5/PARCS V2.7 coupled code. **Progress in Nuclear Energy**, [S. l.], v. 53, n. 8, p. 1084–1090, 2011. DOI: 10.1016/j.pnucene.2010.11.001. Acesso em: 18 maio. 2017.

MURRAY, Raymond L. **Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes**. 6. ed. [s.l.] : United States of America: Butterworth- Heinemann, 2009.

NAHAVANDI, Amir N.; MAKKENCHERY, Suresh. **AN IMPROVED PRESSURIZER MODEL WITH BUBBLE RISE AND CONDENSATE DROP DYNAMICS*NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN**. [s.l: s.n.].

NAHAVANDI, AN; CHIABRANDY, RE; AMIDON, JL. **COMPARISON OF EQUILIBRIUM AND NONEQUILIBRIUM THERMODYNAMIC MODELS IN A WATER- REACTOR PRESSURIZER**. [S. l.], 1967. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/4495881>. Acesso em: 13 set. 2023.

NASCIMENTO, Samira R. V.; LIRA, Carlos A. B. O.; LAPA, Celso M. F.; LIMA, Fernando R. A.; BEZERRA, Jair L.; SILVA, Mário A. B.; OTERO, Maria Elena M.; HERNÁNDEZ, Carlos R. G. Implementing a test facility in reduced scale for analysis of boron dispersion in a pressurizer of an integral compact and modular reactor. **Annals of Nuclear Energy**, [S. l.], v. 105, p. 259–265, 2017. DOI: 10.1016/j.anucene.2017.03.027.

NASCIMENTO, S. R. V. **Implementação de Uma Montagem Experimental em Escala Reduzida para Análise da Dispersão de Boro em Um Pressurizador de Um Reator Modular Compacto e Integral**. 2016a. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, 2016.

NIAN, Victor; ZHONG, Sheng. Economic feasibility of flexible energy productions by small modular reactors from the perspective of integrated planning. **Progress in Nuclear Energy**, [S. l.], v. 118, 2020. DOI: 10.1016/j.pnucene.2019.103106.

NO, Hee Cheon; BAEK, Seung Min. A Non-Equilibrium Three-Region Model for Transient Analysis of PWR Pressurizer. **Second Intl. Topical Meeting on Nuclear**

Power Plant Thermal-Hydraulics and Operations., [S. l.], 1968. Disponível em: <https://koasas.kaist.ac.kr/handle/10203/107096>. Acesso em: 20 set. 2023.

NOVUS. **Data Logger Industrial Multicanais FieldLogger** - data logger wi-fi, data logger sem fio, data logger wireless, registrador wi-fi, registrador sem fio, registrador wireless, wifi, wi fi, - Controladores, Transmissores, Data Logger, Termostatos, Indicadores e Sensores - Automação Industrial. 2023. Disponível em: https://www.novus.com.br/pt/fieldlogger?qclid=EAlalQobChMlhZan3LDr_glVUkdyChOFTg%20khEAYASAAEgLIIsfD_BwE. Acesso em: 9 maio. 2023.

OLTEAN, Stelian Emilian. Mobile Robot Platform with Arduino Uno and Raspberry Pi for Autonomous Navigation. **Procedia Manufacturing**, [S. l.], v. 32, p. 572–577, 2019. DOI: 10.1016/J.PROMFG.2019.02.254. Acesso em: 5 maio. 2023.

PAPUKCHIEV, Angel; YANG, Zhi. Application of the coupled code ATHLET-ANSYS CFX for the simulation of the flow mixing inside the ROCOM test facility. **Progress in Nuclear Energy**, [S. l.], v. 137, p. 103785, 2021. DOI: 10.1016/J.PNUCENE.2021.103785. Acesso em: 3 maio. 2023.

PEIXE, Jacó; BELYTCHKO. TED. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. [s.l.] : Grupo GEN, 2009. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-1941-3/pageid/0>. Acesso em: 27 ago. 2023.

PROCESSING. **Processing.org**. 2023. Disponível em: <https://processing.org/>. Acesso em: 9 maio. 2023.

REDFIELD, J. A.; PRESCOP, V.; MARGOLIS, S. G. Pressurizer Performance During Loss-of-Load Tests at Shippingport: Analysis and Test. **Nuclear Applications**, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 173–181, 1968. DOI: 10.13182/NT68-A26382.

ROSA, José E. P. **Simulação computacional da homogeneização do ácido bórico em um pressurizador de um reator nuclear avançado**. 2013 Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear, [S. l.], 2013.

ROUMEN, Geert Jacob; FERNAEUS, Ylva. Envisioning Arduino Action: A collaborative tool for physical computing in educational settings. **International Journal of Child-Computer Interaction**, [S. l.], v. 29, p. 100277, 2021. DOI: 10.1016/J.IJCCI.2021.100277. Acesso em: 4 maio. 2023.

ŞAHİN, Sümer; ŞAHİN, Hacı Mehmet. Generation-IV reactors and nuclear hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 46, n. 57, p. 28936–28948, 2021. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.182.

SANZ, Ronny Rives; MONTESINOS, Maria Elena; GARCÍA, Carlos; BUENO, Elizabeth Diaz; MAZAIRA, Leorlen Rojas; BEZERRA, Jair De Lima; ALBERTO, Carlos; OLIVEIRA, **Brayner De. Cfd Modeling of Iris Pressurizer ' S Dynamic**. [S. l.], v. 1, 2015.

SILVA, Mário A. B. **Determinação dos parâmetros de uma seção de testes para o pressurizador do reator nuclear IRIS**. 2008. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, [S. l.], 2008.

SILVA, Mário Augusto Bezerra; LIRA, Carlos Alberto Brayner De Oliveira; BARROSO, Antonio Carlos De Oliveira. Fractional Scaling Analysis for IRIS pressurizer reduced scale experiments. **Annals of Nuclear Energy**, [S. l.], v. 37, n. 10, p. 1415–1419, 2010. DOI: 10.1016/j.anucene.2010.05.006.

SIQUEIRA, Antonio Marcos de Oliveira; CHAVES, Gabriel Luz; TANURE, Joyce de Souza; DUTRA, Luana Ventura; SOUZA, Nathan Barros De; VIANNA, Thomás Corrêa. Determinação do coeficiente de difusão em uma solução de cloreto de sódio em diferentes concentrações. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 14053–01e, 2022. DOI: 10.18540/jcecvl8iss3pp14053-01e. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/14053>.

SMITH, Corinne; SATME, Joud; MARTIN, Jacob; DOWNEY, Austin R. J.; VITZILAIOS, Nikolaos; IMRAN, Jasim. UAV rapidly-deployable stage sensor with electro-permanent magnet docking mechanism for flood monitoring in undersampled watersheds. **HardwareX**, [S. l.], v. 12, p. e00325, 2022. DOI: 10.1016/j.ohx.2022.e00325.

TEIMOURI, Zahra; BORUGADDA, Venu Babu; DALAI, Ajay K.; ABATZOGLOU, Nicolas. Application of computational fluid dynamics for modeling of Fischer-Tropsch synthesis as a sustainable energy resource in different reactor configurations: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 160, p. 112287, 2022. DOI: 10.1016/J.RSER.2022.112287. Acesso em: 3 maio. 2023.

TESCHENDORFF, V.; UMMINGER, K.; WEISS, F. P. **Analytical and experimental research into boron dilution events. Eurosafe 2001**, 2001. Disponível em: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:33021377. Acesso em: 15 jul. 2023.

TOTI, A.; VIERENDEELS, J.; BELLONI, F. Coupled system thermal-hydraulic/CFD analysis of a protected loss of flow transient in the MYRRHA reactor. **Annals of Nuclear Energy**, [S. l.], v. 118, p. 199–211, 2018. DOI: 10.1016/J.ANUCENE.2018.03.032. Acesso em: 3 maio. 2023.

TRAVASSOS, Roberto C. A. **Modelos tecnológicos de reatores: Perspectivas e Desenvolvimento no Mundo**. 2014. Disponível em: <http://www.aben.com.br/noticias/modelos-tecnologicos-de-reatores>. Acesso em: 1 jan. 2018.

TRAVASSOS, Roberto C. A. **O Futuro da Energia Nuclear no Mundo e no Brasil**. 2015. Disponível em: http://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/2015-04-29_fgv_futuro_energia_nuclear_travassos_1.pdf. Acesso em: 9 jan. 2018.

VEERAMANICKAM, M. R. M.; VENKATESH, B.; BEWOOR, Laxmi A.; BHOWTE, Yogesh W.; MOHOLKAR, Kavita; BANGARE, Jyoti L. IoT based smart parking model using Arduino UNO with FCFS priority scheduling. **Measurement: Sensors**, [S. l.], v. 24, p. 100524, 2022. DOI: 10.1016/J.MEASEN.2022.100524. Acesso em: 5 maio. 2023.

VUJIĆ, Jasmina; BERGMANN, Ryan M.; ŠKODA, Radek; MILETIĆ, Marija. **Small modular reactors: Simpler, safer, cheaper?** Energy, [S. l.], v. 45, n. 1, p. 288–295,

2012. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2012.01.078. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421200093X>. Acesso em: 16 dez. 2017.

WEI, Hongyang; CHEN, Yitung. Assessment of different turbulence models on the large scale internal heated water pool natural convection simulation. **Annals of Nuclear Energy**, [S. l.], v. 131, p. 23–38, 2019. DOI: 10.1016/J.ANUCENE.2019.03.018. Acesso em: 29 set. 2023.

WNN, World Nuclear News. **China's demonstration HTR-PM reaches full power : New Nuclear - World Nuclear News**. 2022. Disponível em: <https://world-nuclear-news.org/Articles/China-s-demonstration-HTR-PM-reaches-full-power>. Acesso em: 26 ago. 2023.

YARSKY, Peter; THOMPSON, Jason; IRELAND, Andrew; LIEN, Peter; LU, Shanlai. Safety considerations related to boron redistribution during Loss-of-Coolant-Accident initiated beyond design basis events for the NuScale power module. **Nuclear Engineering and Design**, [S. l.], v. 413, p. 112554, 2023. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2023.112554. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002954932300403X>. Acesso em: 26 ago. 2023.

YU, Hao; JU, Haoran; WANG, Mingjun; ZHANG, Jing; QIU, Suizheng; TIAN, Wenxi; SU, G. H. Study of boron diffusion models and dilution accidents in nuclear reactor: A comprehensive review. **Annals of Nuclear Energy** Elsevier Ltd, 2020. DOI: 10.1016/j.anucene.2020.107659.

ZHANG, Xinyu; YANG, Hui; DING, Yuncong; DONG, Bing; SONG, Yuchen; ZHOU, Wentao; WANG, Dezhong. PLIF experiment and verification of boron mixed diffusion model driven by turbulence in nuclear reactor. **Annals of Nuclear Energy**, [S. l.], v. 184, 2023. DOI: 10.1016/j.anucene.2023.109682.

ZHAO, Chunfeng; YU, Na. Dynamic response of generation III+ integral nuclear island structure considering fluid structure interaction effects. **Annals of Nuclear Energy**, [S. l.], v. 112, p. 189–207, 2018. DOI: 10.1016/j.anucene.2017.10.011.

ZHAO, Chunfeng; YU, Na; PENG, Tao; LIPPOLIS, Vincenzo; CORONA, Aldo; MO, Y. L. Study on the dynamic behavior of isolated AP1000 NIB under mainshock-aftershock sequences. **Progress in Nuclear Energy**, [S. l.], v. 119, 2020. DOI: 10.1016/j.pnucene.2019.103144.

ZHONG, Xianping; ZHANG, Xiaolong; YU, Jiyang; SAEED, Muhammad; LI, Yi; CHEN, Zhihui; TANG, Bin; SUN, Yan. Development of an improved non-equilibrium multi-region model for pressurized water reactor pressurizer. **Annals of Nuclear Energy**, [S. l.], v. 126, p. 133–141, 2019. DOI: 10.1016/J.ANUCENE.2018.11.010. Acesso em: 13 set. 2023.

ZIENKIEWICZ, O. C.; MORGAN, K. Finite Elements and Approximation (Dover Books on Engineering). [S. l.], 2006. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Finite_Elements_and_Approximation.html?id=wGE7BzNk3W4C&redir_esc=y. Acesso em: 27 set. 2023.

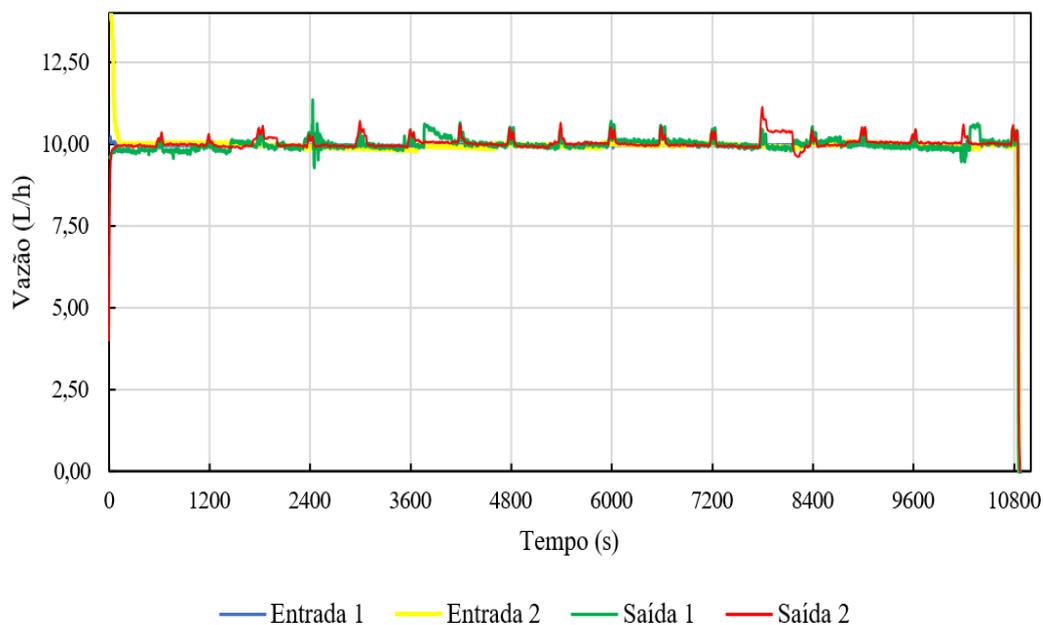
ZONG, Chaoyong; SHI, Maolin; LI, Qingye; XUE, Tianhang; SONG, Xueguan; LI, Xiaofeng; CHEN, Dianjing. Sealing design optimization of nuclear pressure relief valves based on the polynomial chaos expansion surrogate model. **Nuclear Engineering and Technology**, [S. l.], v. 55, n. 4, p. 1382–1399, 2023. DOI: 10.1016/J.NET.2022.12.013. Acesso em: 3 maio. 2023.

ZUBER, Novak; ROHATGI, Upendra S.; WULFF, Wolfgang; CATTON, Ivan. Application of fractional scaling analysis (FSA) to loss of coolant accidents (LOCA). Methodology development. **Nuclear Engineering and Design**, [S. l.], v. 237, n. 15-17 SPEC. ISS., p. 1593– 1607, 2007. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.01.017.

APÊNDICE A – GRÁFICOS DOS DADOS COLETADOS PELO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DA BANCADA EXPERIMENTAL

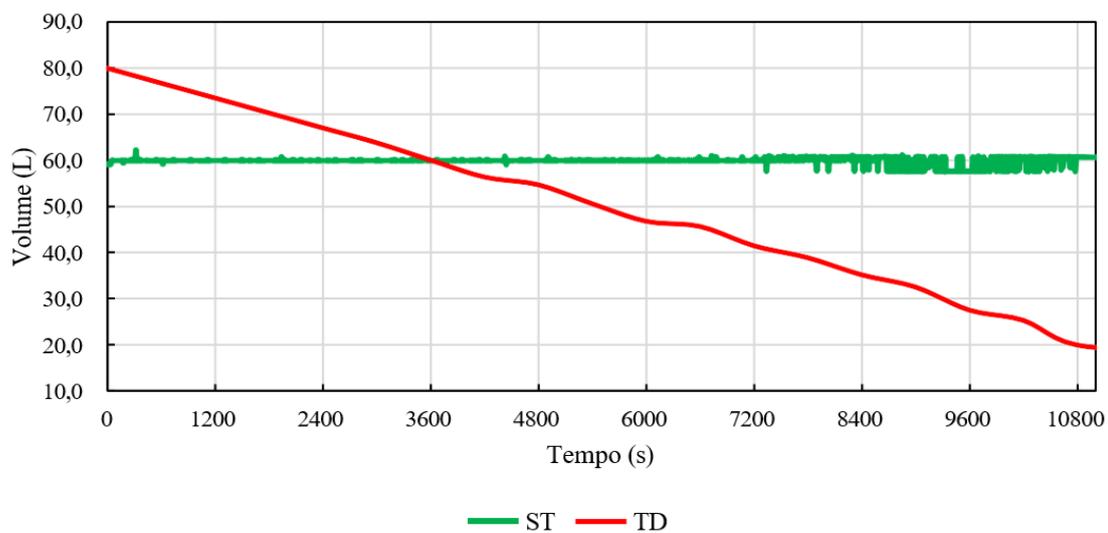
EXPERIMENTO 1 – DEBORAÇÃO 1000 PPM

Figura A1 – Vazão nas entradas e saídas da Seção de Testes (Deboração 1000 ppm)



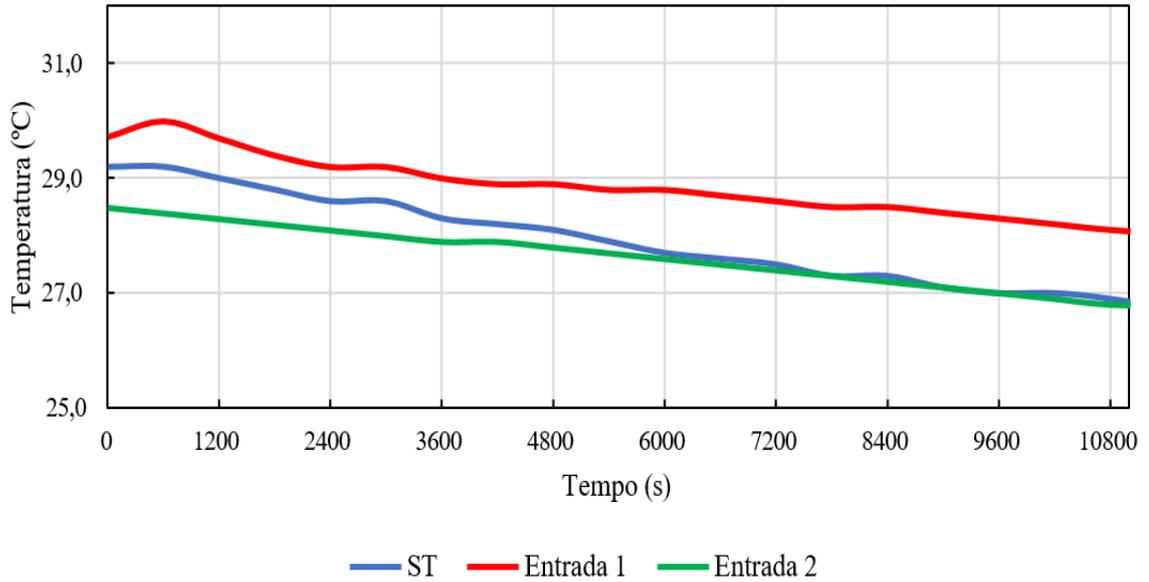
Fonte: O Autor, 2023

Figura A2 – Volume na Seção de Testes e Tanque de Diluição (Deboração 1000 ppm)



Fonte: O Autor, 2023

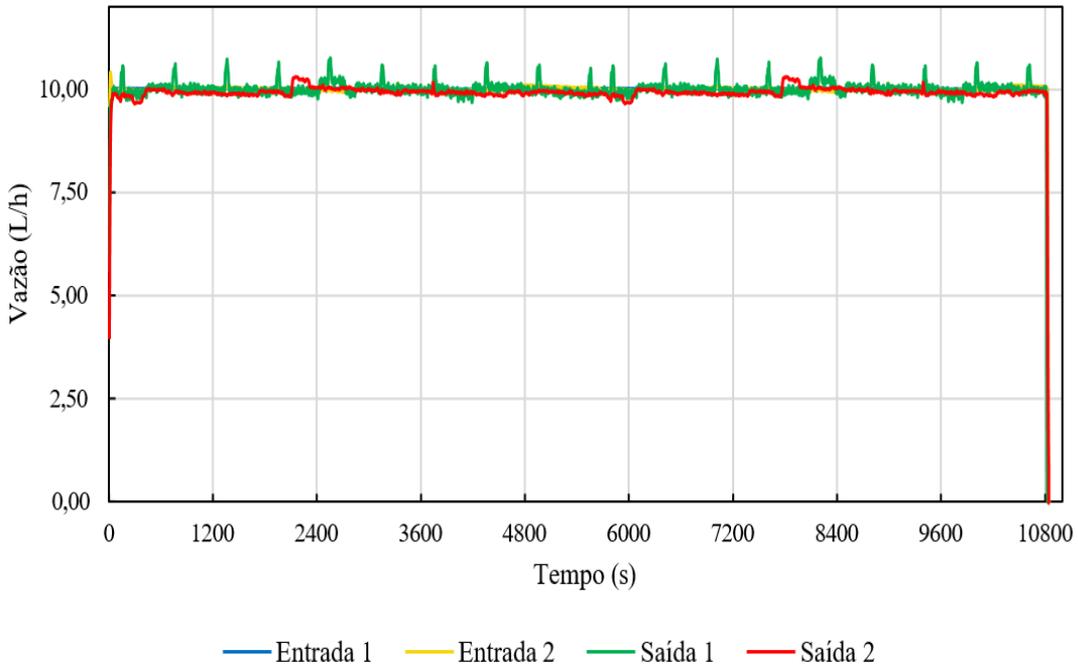
Figura A3 – Temperatura nas Entradas e na Seção de Testes (Deboração 1000 ppm)



Fonte: O Autor, 2023

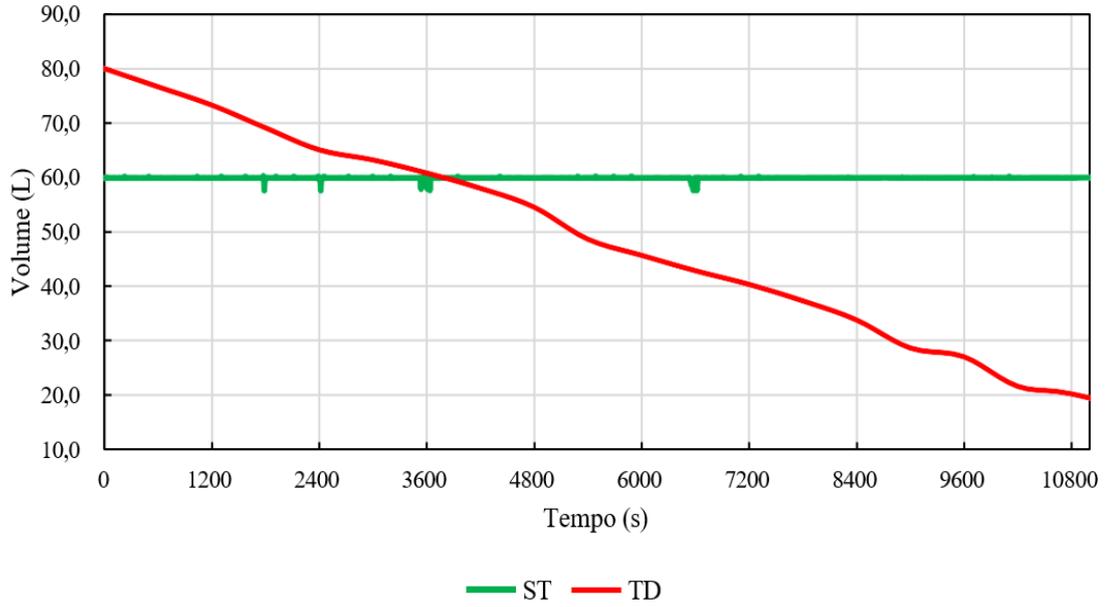
EXPERIMENTO 2 – DEBORAÇÃO 1500 PPM

Figura A4 – Vazão nas entradas e saídas da Seção de Testes (Deboração 1500 ppm)



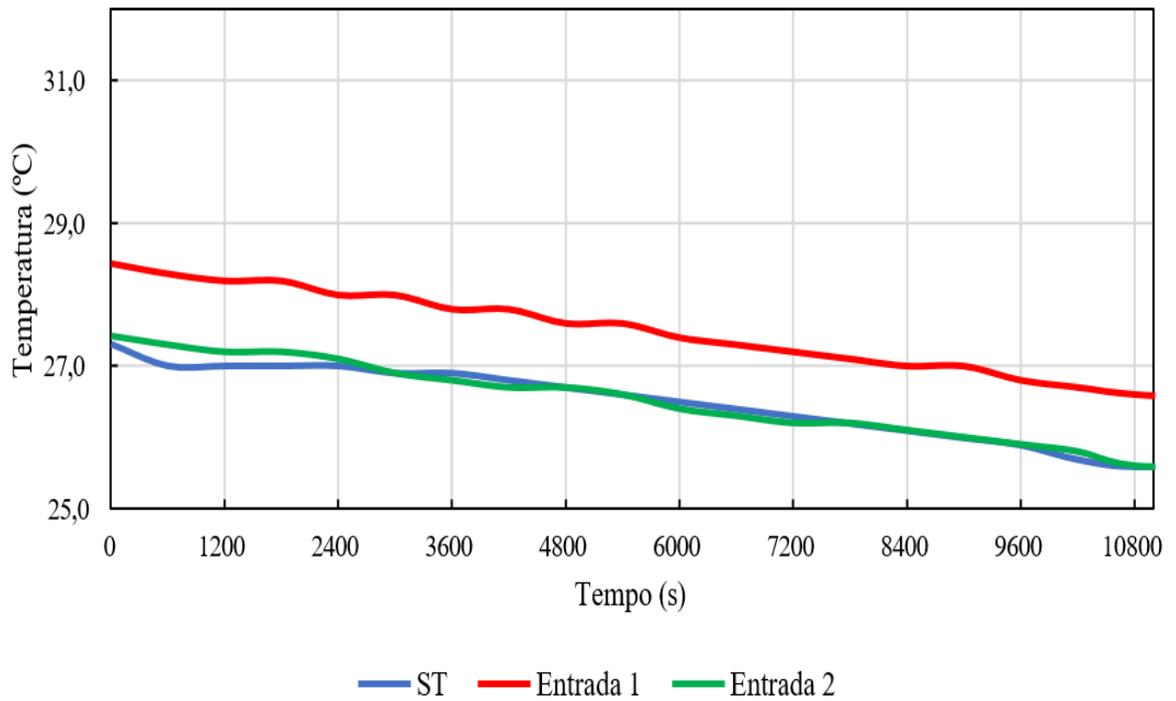
Fonte: O Autor, 2023

Figura A5 – Volume na Seção de Testes e Tanque de Diluição (Debroração 1500 ppm)



Fonte: O Autor, 2023

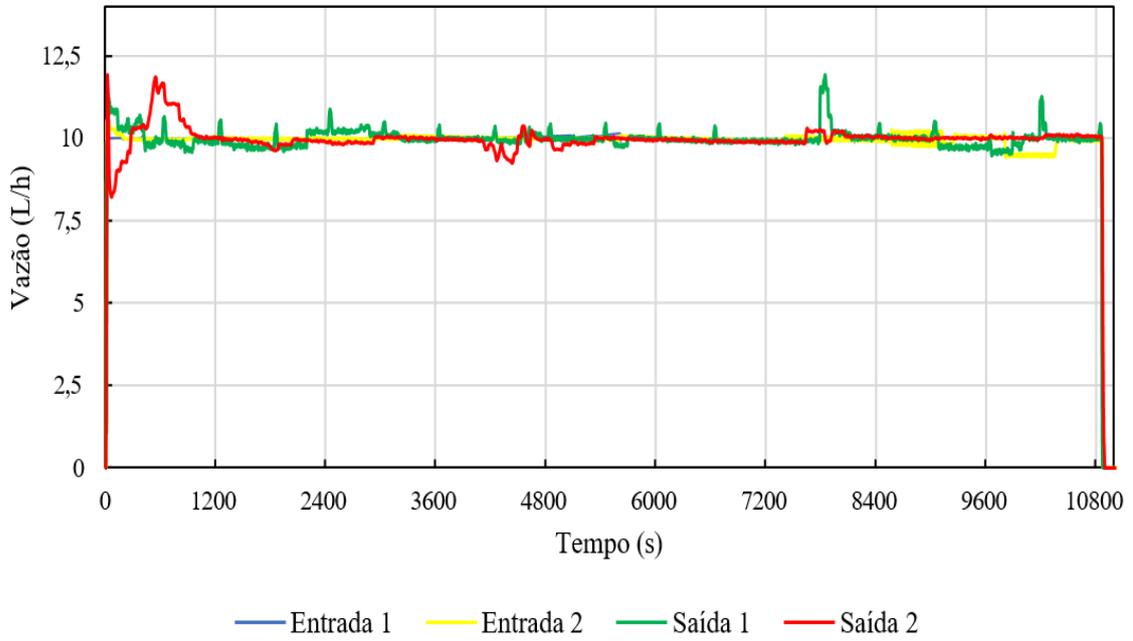
Figura A6 – Temperatura nas Entradas e na Seção de Testes (Debroração 1500 ppm)



Fonte: O Autor, 2023

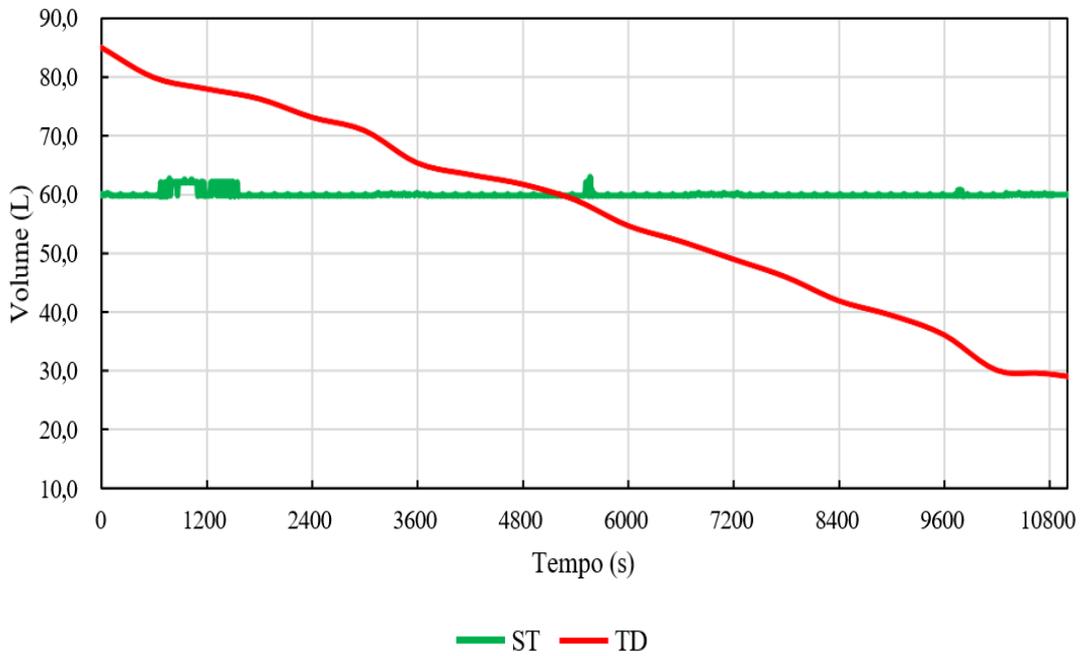
EXPERIMENTO 3 – DEBORAÇÃO 2000 PPM

Figura A7 – Vazão nas entradas e saídas da Seção de Testes (Deboração 2000 ppm)

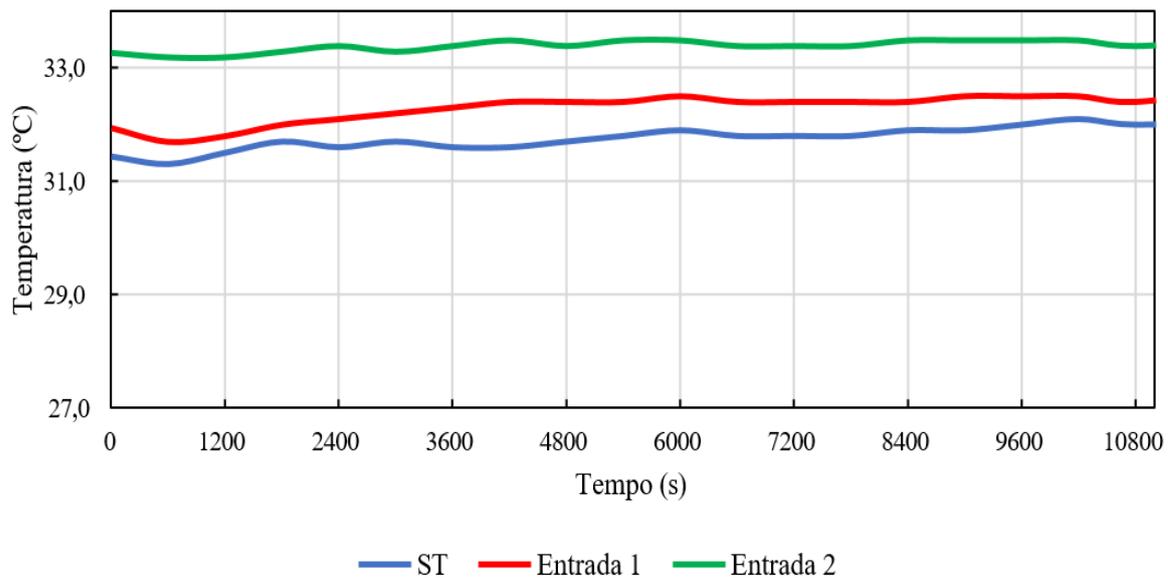


Fonte: O Autor, 2023

Figura A8 – Volume na Seção de Testes e Tanque de Diluição (Deboração 2000 ppm)

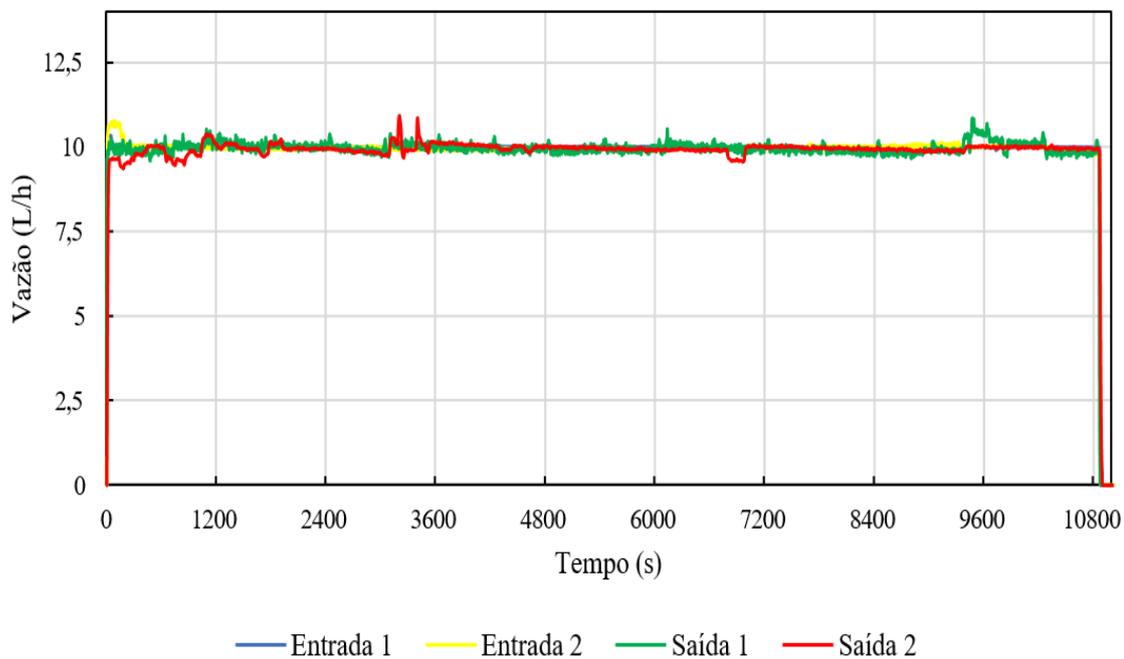


Fonte: O Autor, 2023

Figura A9 – Temperatura nas Entradas e na Seção de Testes (Deboração 2000 ppm)

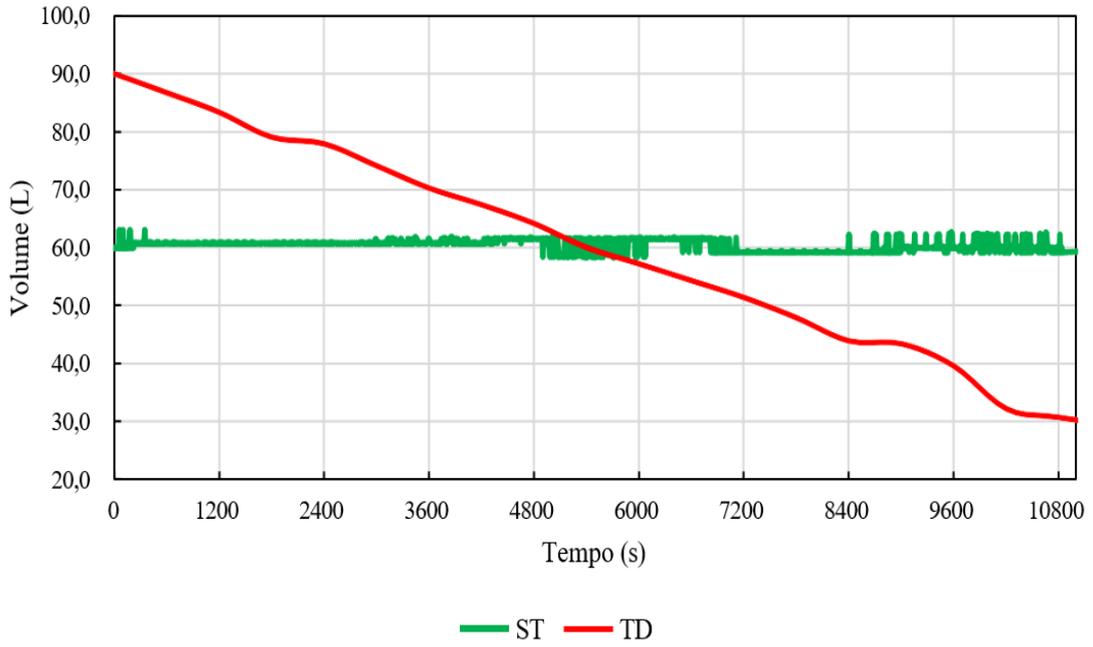
Fonte: O Autor, 2023

EXPERIMENTO 4 – DEBORAÇÃO 2500 PPM

Figura A10 – Temperatura nas Entradas e na Seção de Testes (Deboração 2000 ppm)

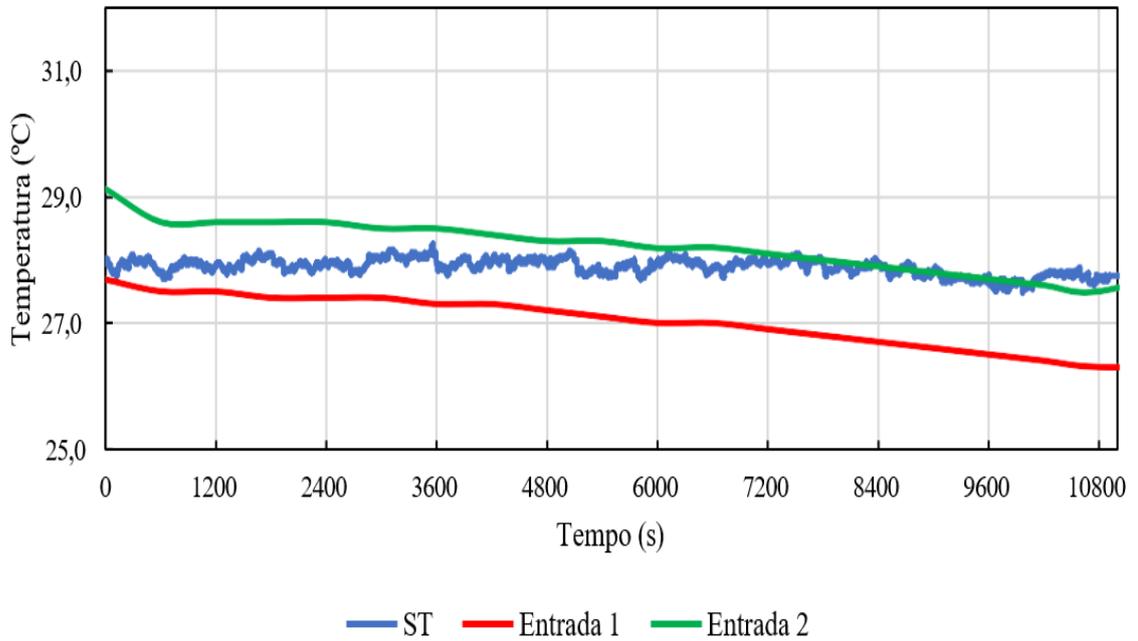
Fonte: O Autor, 2023.

Figura A11 – Vazão nas entradas e saídas da Seção de Testes (Deboração 2500 ppm)



Fonte: O Autor, 2023.

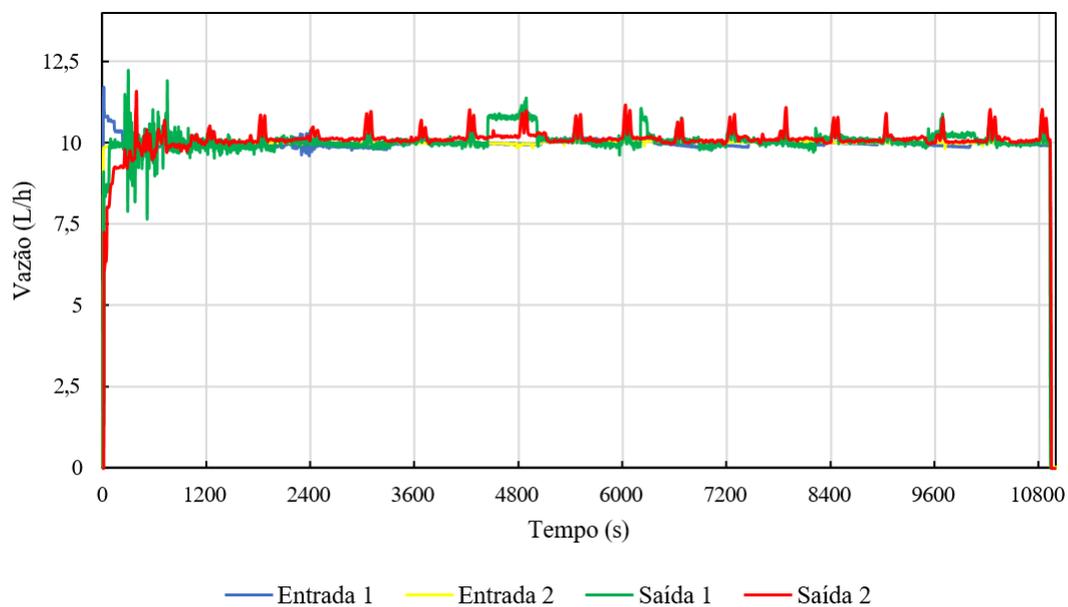
Figura A12 – Temperatura nas Entradas e na Seção de Testes (Deboração 2500 ppm)



Fonte: O Autor, 2023.

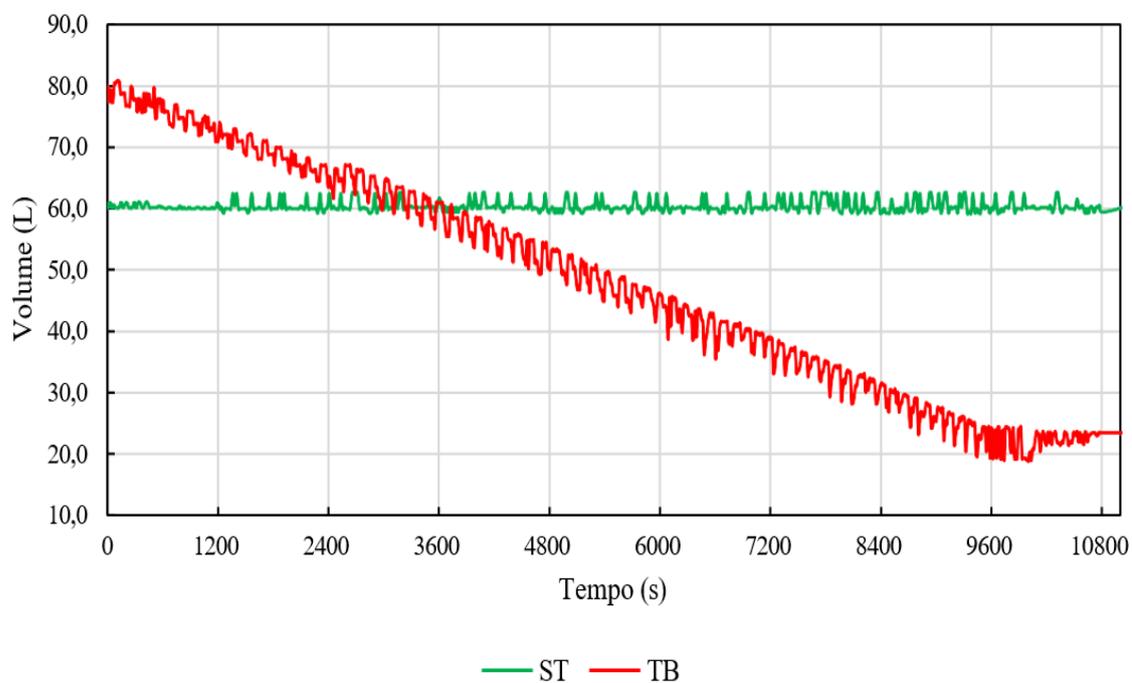
EXPERIMENTO 5 – BORAÇÃO 1000 PPM

Figura A13 – Vazão nas entradas e saídas da Seção de Testes (Boração 1000 ppm)



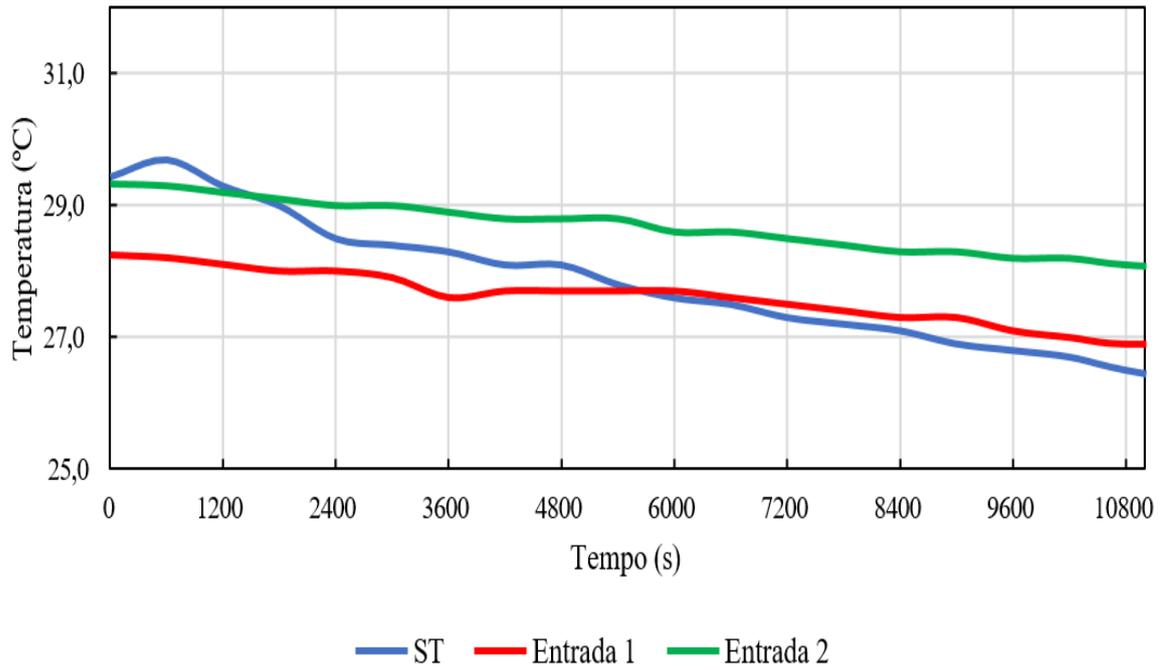
Fonte: O Autor, 2023.

Figura A14 – Volume na Seção de Testes e Tanque de Boração (Boração 1000 ppm)



Fonte: O Autor, 2023.

Figura A15 – Temperatura nas Entradas e na Seção de Testes (Boraração 1000 ppm)



EXPERIMENTO 6 – BORAÇÃO 1500 PPM

Figura A16 – Vazão nas entradas e saídas da Seção de Testes (Boraração 1500 ppm)

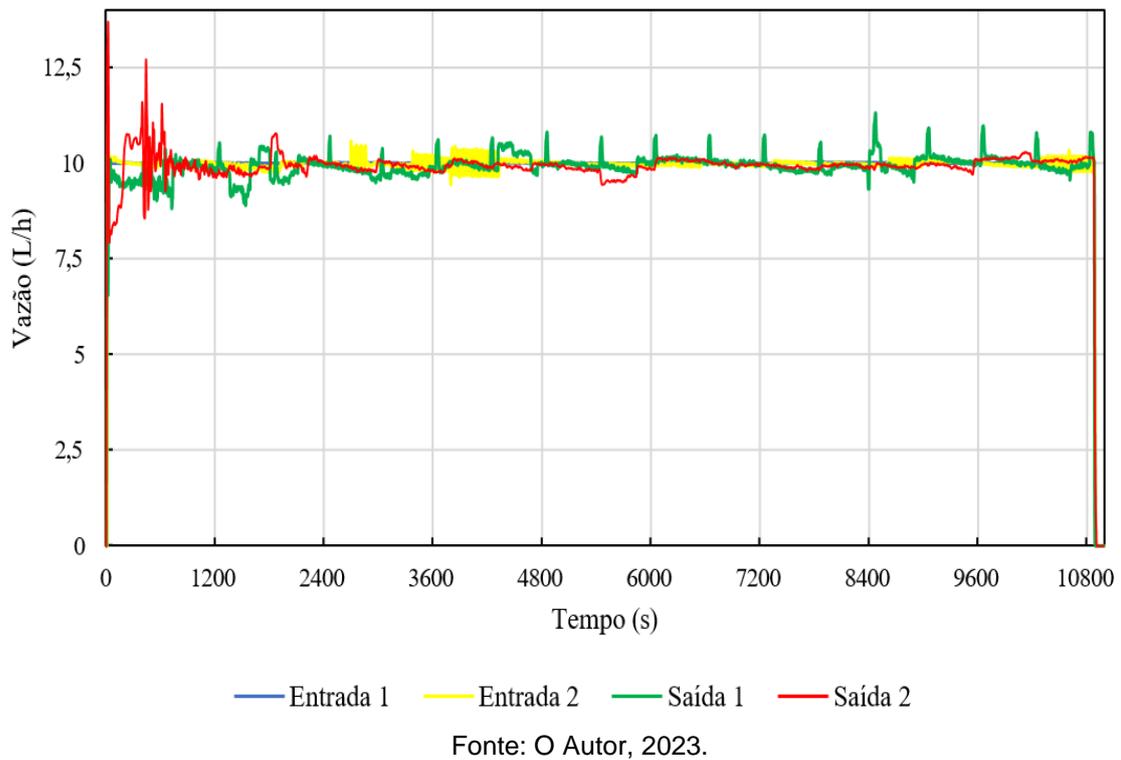
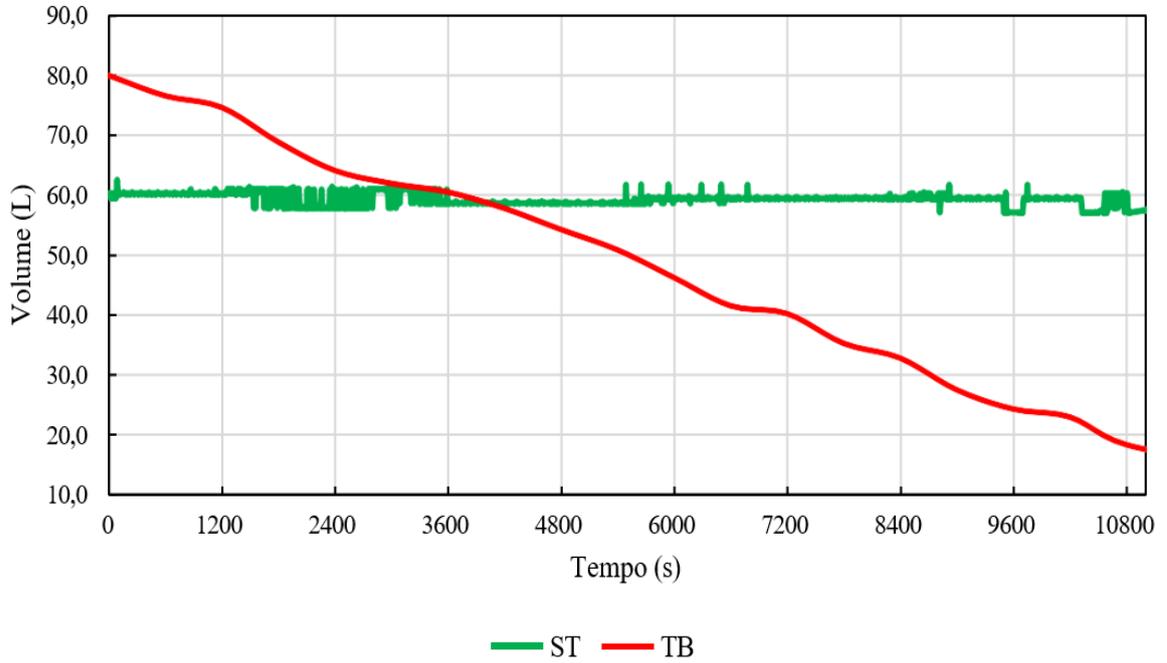
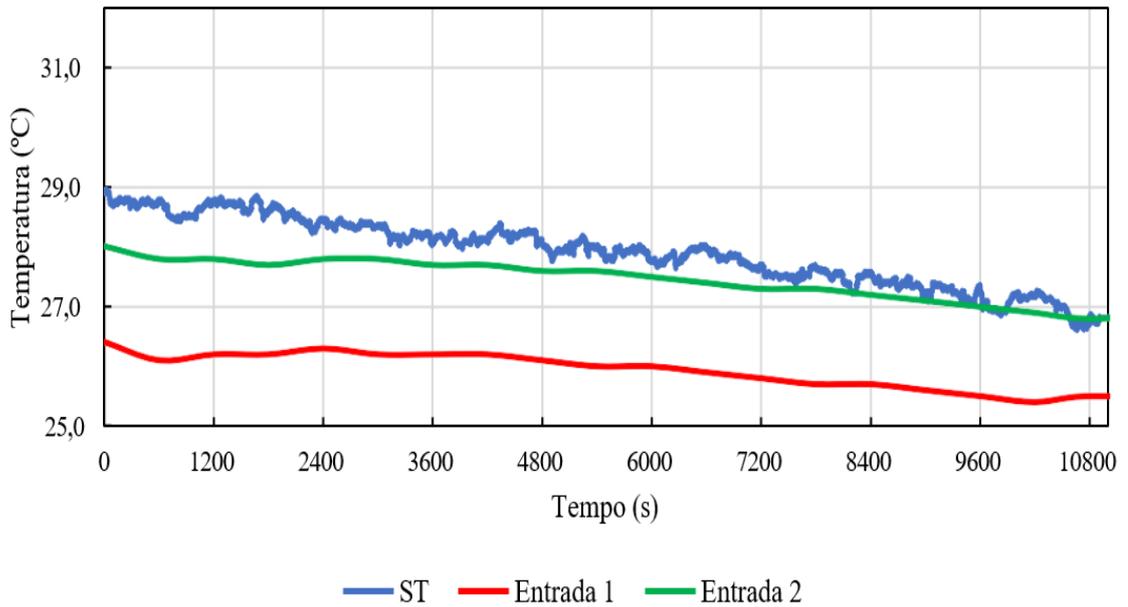


Figura A17 – Volume na Seção de Testes e Tanque de Boração (Boração 1500 ppm)



Fonte: O Autor, 2023.

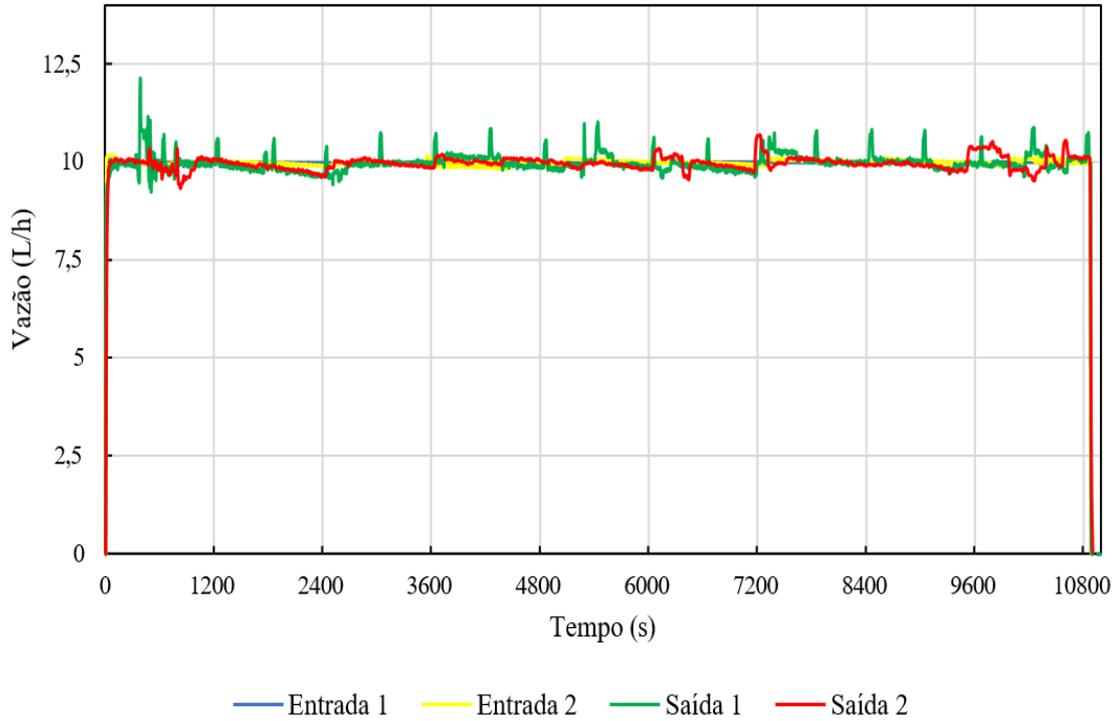
Figura A18 – Temperatura nas Entradas e na Seção de Testes (Boração 1500 ppm)



Fonte: O Autor, 2023.

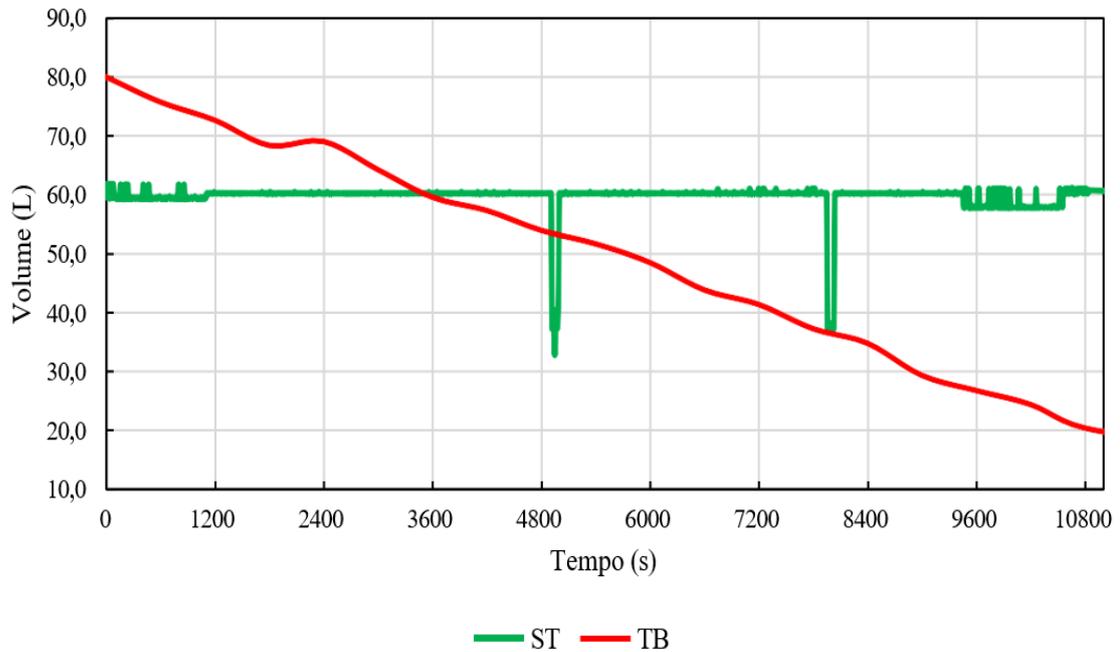
EXPERIMENTO 7 – BORAÇÃO 2000 PPM

Figura A19 – Vazão nas entradas e saídas da Seção de Testes (Boração 2000 ppm)



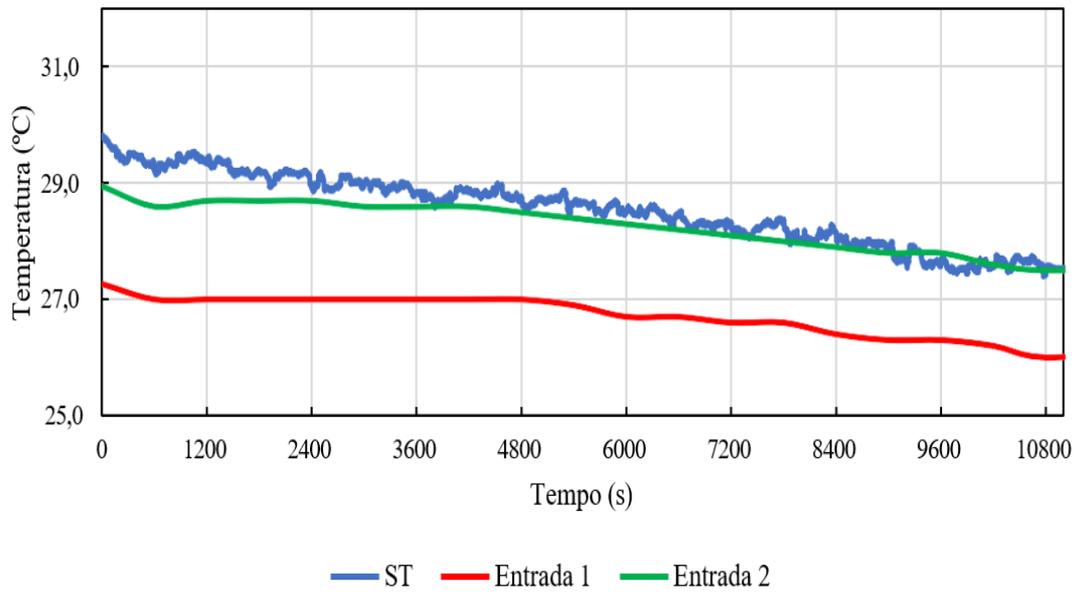
Fonte: O Autor, 2023.

Figura A20 – Volume na Seção de Testes e Tanque de Boração (Boração 2000 ppm)



Fonte: O Autor, 2023.

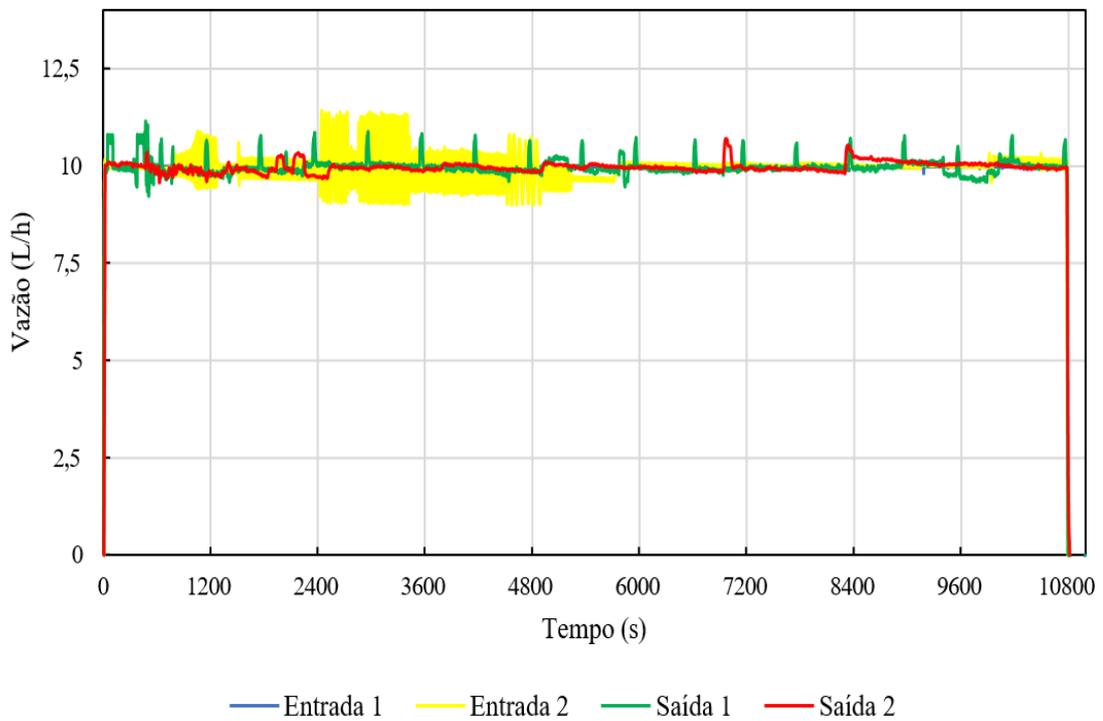
Figura A21 – Temperatura nas Entradas e na Seção de Testes (Boraração 2000 ppm)



Fonte: O Autor, 2023.

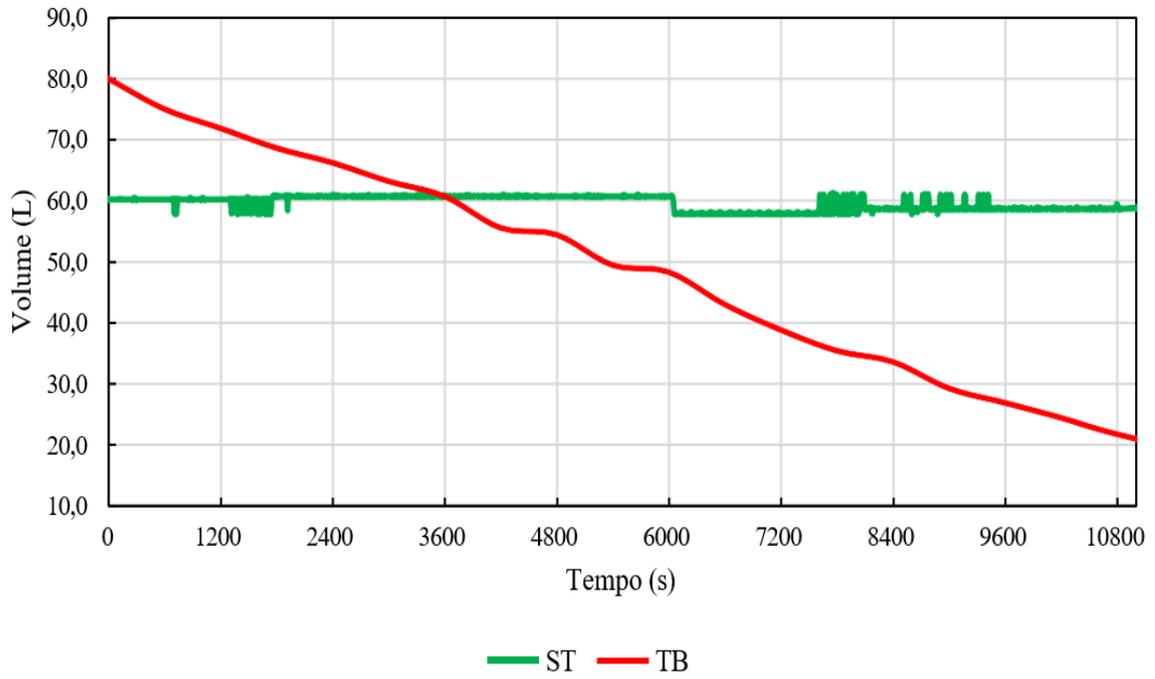
EXPERIMENTO 8 – BORAÇÃO 2500 PPM

Figura A22 – Vazão nas entradas e saídas da Seção de Testes (Boraração 2500 ppm)



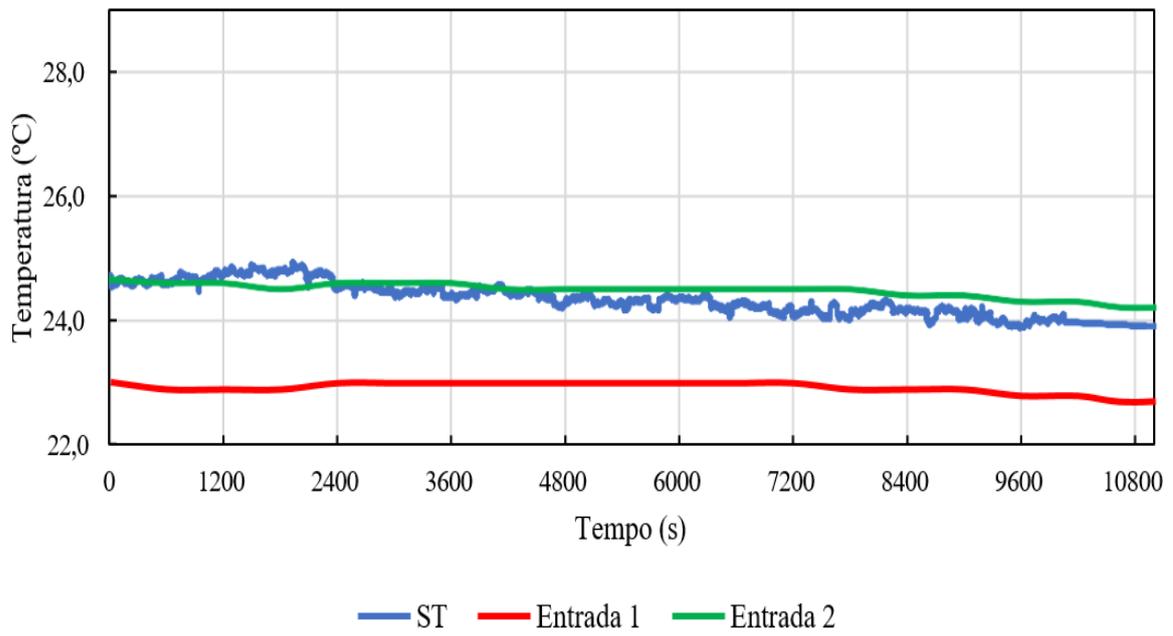
Fonte: O Autor, 2023.

Figura A23 – Volume na Seção de Testes e Tanque de Boração (Boração 2500 ppm)



Fonte: O Autor, 2023.

Figura A24 – Temperatura nas Entradas e na Seção de Testes (Boração 2500 ppm)



Fonte: O Autor, 2023.

APÊNDICE B – DADOS DAS MEDIÇÕES DE CONDUTIVIDADE

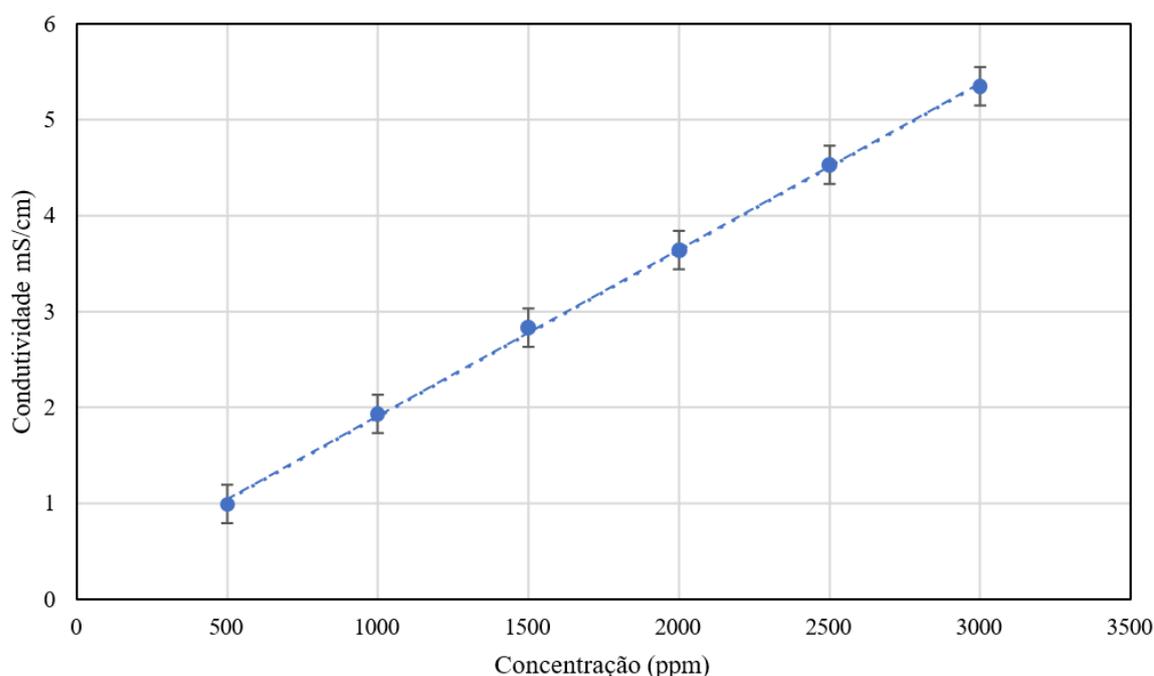
CURVA DE CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE CONDUTIVIDADE DE BANCADA

Tabela A1 – Medidas de condutividade da curva de calibração e seus respectivos desvios padrão

CONCENTRAÇÃO (PPM)	CONDUTIVIDADE MS/CM)	DESVIO PADRÃO
500	0,99	0,02
1000	1,93	0,02
1500	2,83	0,03
2000	3,64	0,02
2500	4,53	0,03
3000	5,35	0,02

Fonte: O Autor, 2023.

Figura A25 – Gráfico da curva de calibração do medidor de condutividade de bancada



Fonte: O Autor, 2023.

MEDIDAS DE CONDUTIVIDADE DOS EXPERIMENTOS

Em cada experimento foi coletado aproximadamente 100 mL em cada saída em intervalos de aproximadamente 10 minutos (600 segundos) até que se completassem de 3 horas de execução (10800 segundos). Essas amostras eram armazenadas, e, em momento posterior eram aferidas no medidor de condutividade de bancada. Cada amostra passou por 3 medições para que se tivesse uma média

dos valores aferidos. A seguir estão os dados obtidos em cada experimento de boração e deboração.

Tabela A2 – Medidas de condutividades do experimento de deboração 1000 ppm

MEDIÇÕES (MINUTOS)	SAÍDA 1 ($\mu\text{S}/\text{CM}$)			MÉDIA 1 ($\mu\text{S}/\text{CM}$)	SAÍDA 2 ($\mu\text{S}/\text{CM}$)			MÉDIA 2
0	1935	1940	1936	1937	1935	1940	1936	1937
10	1872	1876	1873	1873	1882	1878	1879	1879
20	1758	1757	1756	1757	1783	1781	1784	1783
30	1652	1653	1656	1653	1674	1675	1672	1674
40	1569	1570	1571	1570	1588	1587	1586	1587
50	1483	1482	1483	1483	1494	1497	1497	1497
60	1389	1391	1392	1391	1404	1400	1401	1401
70	1332	1329	1326	1329	1337	1338	1339	1338
80	1268	1267	1265	1267	1281	1282	1280	1281
90	1205	1203	1201	1203	1213	1208	1209	1209
100	1135	1135	1134	1135	1141	1134	1137	1137
110	1062	1062	1063	1062	1076	1075	1075	1075
120	1021	1019	1018	1019	1032	1031	1030	1031
130	965	962,8	965,6	965	977	975,1	975,6	975,6
140	912,7	914,9	913	913	923,6	923,1	921,6	923,1
150	866,1	868,3	866,8	866,8	873,6	872,8	873,5	873,5
160	813,1	812,8	814	813,1	820,1	820,3	822,4	820,3
170	784	782,9	782,4	782,9	792,8	790,8	791,6	791,6
180	744,7	746,1	745,6	745,6	752,8	752,4	752,6	752,6

Fonte: O Autor, 2023.

Tabela A3 – Medidas de condutividades do experimento de deboração 1500 ppm

MEDIÇÕES (MINUTOS)	SAÍDA 1 ($\mu\text{S}/\text{CM}$)			MÉDIA 1 ($\mu\text{S}/\text{CM}$)	SAÍDA 2 ($\mu\text{S}/\text{CM}$)			MÉDIA 2
0	2800	2880	2810	2830	2780	2890	2820	2830
10	2620	2620	2620	2620	2760	2760	2760	2760
20	2580	2570	2570	2570	2630	2640	2630	2630
30	2397	2397	2399	2397	2468	2472	2474	2472
40	2269	2271	2268	2269	2343	2341	2343	2343
50	2134	2131	2130	2131	2200	2201	2202	2201
60	2024	2025	2028	2025	2103	2104	2105	2104
70	1884	1888	1882	1884	1980	1984	1984	1984
80	1810	1811	1809	1810	1880	1880	1878	1880
90	1708	1708	1710	1708	1783	1781	1779	1781
100	1622	1620	1621	1621	1710	1704	1705	1705
110	1554	1555	1550	1554	1610	1607	1607	1607
120	1463	1460	1461	1461	1522	1519	1518	1519
130	1393	1393	1391	1393	1449	1446	1446	1446
140	1320	1317	1318	1318	1370	1367	1366	1367
150	1258	1253	1254	1254	1289	1287	1287	1287
160	1191	1189	1188	1189	1229	1224	1225	1225
170	1122	1123	1121	1122	1173	1172	1171	1172
180	1074	1071	1074	1074	1106	1105	1104	1105

Fonte: O Autor, 2023.

Tabela A4 – Medidas de condutividades do experimento de deborção 2000 ppm

MEDIÇÕES (MINUTOS)	SAÍDA 1 ($\mu\text{S}/\text{CM}$)			MÉDIA 1 ($\mu\text{S}/\text{CM}$)	SAÍDA 2 ($\mu\text{S}/\text{CM}$)			MÉDIA 2
0	3,67	3,71	3,69	3,69	3,66	3,71	3,68	3,69
10	3,67	3,67	3,67	3,67	3,69	3,69	3,69	3,69
20	3,49	3,49	3,5	3,49	3,53	3,53	3,53	3,53
30	3,33	3,34	3,33	3,33	3,32	3,32	3,32	3,32
40	3,17	3,18	3,18	3,18	3,17	3,17	3,17	3,17
50	2,98	2,97	2,97	2,97	2,99	2,99	2,99	2,99
60	2,83	2,83	2,84	2,83	2,85	2,85	2,85	2,85
70	2,69	2,69	2,69	2,69	2,7	2,71	2,7	2,7
80	2,55	2,55	2,55	2,55	2,486	2,487	2,488	2,49
90	2,369	2,364	2,367	2,37	2,363	2,363	2,366	2,36
100	2,23	2,233	2,233	2,23	2,224	2,224	2,223	2,22
110	2,123	2,126	2,126	2,13	2,102	2,103	2,107	2,1
120	2,018	2,019	2,019	2,02	1,998	1,999	2,001	2
130	1,913	1,912	1,911	1,91	1,894	1,895	1,894	1,89
140	1,811	1,81	1,813	1,81	1,786	1,786	1,789	1,79
150	1,716	1,717	1,717	1,72	1,678	1,677	1,678	1,68
160	1,622	1,622	1,623	1,62	1,594	1,593	1,593	1,59
170	1,509	1,51	1,511	1,51	1,516	1,517	1,516	1,52
180	1,443	1,442	1,445	1,44	1,436	1,434	1,433	1,43

Fonte: O Autor, 2023.

Tabela A5 – Medidas de condutividades do experimento de deborção 2500 ppm

MEDIÇÕES (MINUTOS)	SAÍDA 1 ($\mu\text{S}/\text{CM}$)			MÉDIA 1 ($\mu\text{S}/\text{CM}$)	SAÍDA 2 ($\mu\text{S}/\text{CM}$)			MÉDIA 2
0	4,50	4,53	4,51	4,51	4,49	4,53	4,50	4,51
10	4,48	4,48	4,49	4,48	4,50	4,50	4,50	4,50
20	4,28	4,29	4,28	4,28	4,28	4,28	4,28	4,28
30	4,08	4,08	4,08	4,08	4,03	4,03	4,03	4,03
40	3,86	3,85	3,85	3,85	3,86	3,86	3,85	3,86
50	3,65	3,65	3,66	3,65	3,63	3,63	3,63	3,63
60	3,45	3,45	3,45	3,45	3,46	3,46	3,46	3,46
70	3,27	3,27	3,27	3,27	3,28	3,29	3,28	3,28
80	3,10	3,10	3,10	3,10	3,13	3,12	3,12	3,12
90	2,95	2,94	2,95	2,95	2,95	2,94	2,94	2,94
100	2,84	2,83	2,83	2,83	2,81	2,8	2,79	2,8
110	2,66	2,66	2,66	2,66	2,68	2,68	2,68	2,68
120	2,498	2,493	2,497	2,5	2,51	2,511	2,51	2,51
130	2,36	2,36	2,364	2,36	2,357	2,356	2,353	2,36
140	2,19	2,189	2,191	2,19	2,259	2,258	2,263	2,26
150	2,111	2,111	2,106	2,110	2,148	2,150	2,148	2,150
160	2,000	2,002	2,002	2,000	2,021	2,021	2,019	2,020
170	1,914	1,913	1,911	1,910	1,928	1,930	1,929	1,930
180	1,792	1,791	1,790	1,790	1,818	1,819	1,819	1,820

Fonte: O Autor, 2023.

Tabela A6 – Medidas de condutividades do experimento de boração 1000 ppm

MEDIÇÕES (MINUTOS)	SAÍDA 1 (µS/CM)			MÉDIA 1 (µS/CM)	SAÍDA 2 (µS/CM)			MÉDIA 2
0	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1
10	714,9	716,4	717,1	716,4	671,8	671,1	668,6	671,1
20	1026	1025	1024	1025	1007	1006	1006	1006
30	1138	1135	1135	1135	1132	1132	1131	1132
40	1183	1184	1184	1184	1183	1183	1183	1183
50	1229	1230	1230	1230	1223	1222	1221	1222
60	1277	1274	1274	1274	1271	1268	1268	1268
70	1328	1331	1333	1331	1331	1333	1330	1331
80	1413	1413	1410	1413	1409	1408	1406	1408
90	1449	1445	1447	1447	1440	1437	1436	1437
100	1481	1480	1481	1481	1484	1482	1479	1482
110	1497	1501	1495	1497	1500	1486	1484	1486
120	1535	1538	1533	1535	1521	1520	1518	1520
130	1551	1549	1550	1550	1550	1550	1545	1550
140	1592	1593	1588	1592	1582	1583	1582	1582
150	1627	1629	1625	1627	1604	1604	1604	1604
160	1624	1624	1620	1624	1612	1612	1613	1612
170	1645	1646	1645	1645	1641	1641	1641	1641
180	1640	1639	1638	1639	1638	1637	1637	1637

Fonte: O Autor, 2023.

Tabela A7 – Medidas de condutividades do experimento de boração 1500 ppm

MEDIÇÕES (MINUTOS)	SAÍDA 1 (µS/CM)			MÉDIA 1 (µS/CM)	SAÍDA 2 (µS/CM)			MÉDIA 2
0	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5
10	803,1	804,0	805,5	804,0	481,1	481,0	480,0	481,0
20	1484	1483	1484	1484	1506	1509	1510	1508
30	1863	1866	1860	1863	1904	1900	1901	1902
40	2058	2059	2054	2057	2095	2094	2095	2095
50	2162	2160	2158	2160	2207	2209	2205	2207
60	2221	2221	2228	2223	2246	2242	2242	2243
70	2230	2225	2226	2227	2264	2262	2259	2262
80	2230	2220	2226	2225	2280	2273	2271	2275
90	2227	2241	2227	2232	2263	2257	2259	2260
100	2217	2210	2211	2213	2229	2234	2236	2233
110	2226	2224	2226	2225	2238	2243	2240	2240
120	2202	2203	2200	2202	2221	2221	2226	2223
130	2221	2225	2229	2225	2242	2242	2243	2242
140	2231	2238	2234	2234	2241	2246	2246	2244
150	2260	2256	2258	2258	2255	2262	2262	2260
160	2274	2273	2277	2275	2276	2276	2278	2277
170	2284	2286	2288	2286	2294	2299	2300	2298
180	2295	2300	2298	2298	2316	2318	2323	2319

Fonte: O Autor, 2023.

Tabela A8 – Medidas de condutividades do experimento de boração 2000 ppm

MEDIÇÕES (MINUTOS)	SAÍDA 1 (µS/CM)			MÉDIA 1 (µS/CM)	SAÍDA 2 (µS/CM)			MÉDIA 2
	0	103,4	103,4	103,4	103,4	103,4	103,4	103,4
10	885,9	887,7	886,4	887,0	467,6	466,9	467,4	467,0
20	1984	1984	1986	1985	2109	2111	2109	2110
30	2494	2495	2495	2495	2740	2730	2740	2737
40	2790	2790	2790	2790	2840	2830	2830	2833
50	2940	2930	2930	2933	2990	2990	2990	2990
60	2990	2980	2980	2983	3030	3030	3030	3030
70	3000	2990	2990	2993	3030	3030	3020	3027
80	3020	3020	3020	3020	3080	3070	3070	3073
90	3020	3010	3010	3013	3060	3070	3060	3063
100	3020	3030	3030	3027	3070	3070	3070	3070
110	3020	3020	3030	3023	3070	3070	3070	3070
120	3010	3010	3010	3010	3070	3070	3060	3067
130	3020	3020	3020	3020	3070	3070	3070	3070
140	3020	3020	3020	3020	3070	3060	3060	3063
150	3040	3040	3040	3040	3060	3060	3070	3063
160	3030	3030	3030	3030	3070	3070	3070	3070
170	3040	3040	3040	3040	3080	3080	3090	3083
180	3050	3050	3050	3050	3090	3100	3090	3093

Fonte: O Autor, 2023.

Tabela A9 – Medidas de condutividades do experimento de boração 2500 ppm

MEDIÇÕES (MINUTOS)	SAÍDA 1 (µS/CM)			MÉDIA 1 (µS/CM)	SAÍDA 2 (µS/CM)			MÉDIA 2
	0	131,1	131,1	131,1	131,1	131,1	131,1	131,1
10	766,5	765,0	765,5	766,0	657,3	657,6	657,0	657,0
20	2570	2580	2580	2577	2670	2660	2660	2663
30	3220	3220	3220	3220	3290	3290	3290	3290
40	3510	3510	3510	3510	3590	3590	3590	3590
50	3650	3650	3650	3650	3720	3720	3720	3720
60	3710	3710	3710	3710	3760	3760	3770	3763
70	3770	3780	3770	3773	3820	3810	3810	3813
80	3790	3790	3790	3790	3840	3840	3840	3840
90	3790	3790	3790	3790	3840	3840	3840	3840
100	3830	3830	3830	3830	3900	3870	3880	3883
110	3840	3840	3840	3840	3880	3890	3880	3883
120	3850	3850	3850	3850	3890	3890	3880	3887
130	3870	3860	3870	3867	3890	3880	3880	3883
140	3860	3870	3860	3863	3900	3890	3900	3897
150	3880	3870	3880	3877	3930	3930	3930	3930
160	3920	3920	3920	3920	3940	3950	3960	3950
170	3940	3930	3930	3933	3970	3970	3980	3973
180	3940	3950	3950	3947	3990	3990	3990	3990

Fonte: O Autor, 2023.