

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA MONTAGEM EXPERIMENTAL
EM ESCALA REDUZIDA PARA ANÁLISE DA DISPERSÃO DE BORO
EM UM PRESSURIZADOR DE UM REATOR MODULAR
COMPACTO E INTEGRAL**

SAMIRA RUANA VIDAL DO NASCIMENTO

Orientador interno:

Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

Orientador externo:

Prof. Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa

Recife, PE

Fevereiro, 2016

SAMIRA RUANA VIDAL DO NASCIMENTO

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA MONTAGEM EXPERIMENTAL
EM ESCALA REDUZIDA PARA ANÁLISE DA DISPERSÃO DE BORO
EM UM PRESSURIZADOR DE UM REATOR MODULAR
COMPACTO E INTEGRAL**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Tecnologias Energéticas e Nucleares para
obtenção do título de Doutor em Ciências, Área
de Concentração: Engenharia de Reatores.

Orientador interno:

Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

Orientador externo:

Prof. Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa

Recife, PE

Fevereiro, 2016

Catálogo na fonte
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

N244i Nascimento, Samira Ruana Vidal do.
Implementação de uma montagem experimental em escala reduzida para análise da dispersão de boro em um pressurizador de um reator modular compacto e integral. / Samira Ruana Vidal do Nascimento. - Recife: O Autor, 2016.
94 f. : il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira.
Orientador: Prof. Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2016.
Inclui referências bibliográficas e apêndice.

1. Small Modular Reactors. 2. iPWR. 3. Pressurizador. 4. Boro. 5. Montagem experimental. I. Lira, Carlos Alberto Brayner de Oliveira, orientador. II. Lapa, Celso Marcelo Franklin, orientador. III. Título.

UFPE
CDD 621.483 (21. ed.) BDEN/2016-12

Implementação de uma Montagem Experimental em Escala Reduzida para Análise da Dispersão de Boro em um Pressurizador de um Reator Modular Compacto e Integral.

Samira Ruana Vidal do Nascimento

APROVADA EM: 25.02.2016

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

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira – UFPE/DEN

Prof. Dr. Mário Augusto Bezerra da Silva – UFPE/DEN

Prof. Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa – IEN/RJ

Prof. Dr. Fernando Roberto Andrade de Lima – CRCN-NE-CNEN

Prof. Dr. José Wilson Vieira – UPE-IFPE

Profa. Dra. Maria de Lourdes Moreira – IEN/RJ

Visto e permitida a impressão

Coordenador(a) do PROTEN/DEN/UFPE

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira pela grande oportunidade de desenvolver esse trabalho de tese, por sua orientação e suas contribuições durante mais uma etapa de minha formação acadêmica.

Ao professor Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa por aceitar contribuir na consolidação desse trabalho. Por todas as discussões e desafios lançados que me motivaram a buscar respostas e condições para execução desse trabalho.

Ao professor Dr. Jair de Lima Bezerra por toda a disponibilidade e dedicação. Por compartilhar os momentos de conquista e também as aflições sofridas durante esse processo. Muito grata por sempre ter as palavras que me ajudaram a perseverar.

Ao professor Dr. Fernando Roberto Andrade de Lima por me acolher no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste. Por toda disponibilidade em ajudar buscando a melhor infraestrutura para a instalação experimental e as melhores condições de trabalho.

Ao professor Dr. Mário Augusto Bezerra da Silva pelas ricas discussões e revisões ao longo dessa jornada.

À professora Dra. Maria de Lourdes Moreira por estar sempre disponível para me escutar e procurar alternativas que pudessem consolidar a montagem da instalação experimental.

Ao professor Dr. Antônio Carlos Oliveira Barroso pelas discussões que me deram segurança em continuar o trabalho.

Ao doutorando André Felipe da Silva de Oliveira por me guiar no aprendizado de uma nova ferramenta para estudo da dinâmica de fluidos.

Ao mestre Eduardo pelas discussões.

Ao amigo José Edson por estar disponível para ajudar. Por seu exemplo de força e determinação.

À Daniele Castro pela autorização; à Thamyres, Suzilane e Priscila, pela execução dos testes referente à condutividade elétrica na Faculdade Estácio do Recife.

À Ana Rosa e a Maria do Carmo pelas discussões sobre às propriedades do Ácido Bórico, assim como a metodologia para os testes de solubilidade.

Ao Departamento de Análises Ambientais do Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste na pessoa de Elvis Joacir de França, Crescêncio Andrade Silva Filho e Gilberto Nascimento de Arruda, por toda a assistência operacional referente ao uso de equipamentos e procedimentos de análises, além de disponibilizar a água destilada para o uso na instalação experimental.

Ao Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco na pessoa do professor José Araújo, por disponibilizar água destilada e ao Sr. Antônio, a Jairo Dias e a Alberto, por auxiliar nessa coleta.

Ao amigo Wellington Andrade pelas fotos e imagens cedidas para esse trabalho.

À Willdauany Cristina pelo apoio durante as medidas da vazão volumétrica em função da frequência de rotação da bomba.

Ao companheiro, amigo e amante Leonardo Bruno Ferreira de Souza, por sempre me apontar uma resposta, mesmo sem saber qual é. Por toda parceria, paciência e motivação nessa jornada.

À minha mãe, Maria de Lourdes Vidal de Negreiros, e ao meu pai, José Edivaldo do Nascimento, pelos princípios ensinados.

As amigas Renata Libonati, Viviane Khoury, Cláudia Patrícia, Poliane Angelo, Ana Rosa, Rita de Cássia, Luciana, Maria do Carmo e aos amigos Henio Melo, Wilton, Wildson pelo encorajamento.

Ao pessoal do apoio, Mariana, Sra. Rejane, Sr. Mauro, Sr. Marconi, Bruno, Moyses, Déde, Jaci, Fernanda, sou muito grata.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado.

À Agência Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos subsídios destinados ao desenvolvimento projeto.

IMPLEMENTAÇÃO DE UMA MONTAGEM EXPERIMENTAL EM ESCALA REDUZIDA PARA ANÁLISE DA DISPERSÃO DE BORO EM UM PRESSURIZADOR DE UM REATOR MODULAR COMPACTO E INTEGRAL

Autora: **Samira Ruana Vidal do Nascimento**

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

Orientador externo: Prof. Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa

RESUMO

Os *Small Modular Reactors*, SMRs, são reatores modulares compactos variantes dos reatores de geração III+ que apresentam características atrativas, como a simplicidade, maior segurança e são economicamente competitivos. Atualmente, há muitos projetos de SMRs com características estruturais distintas, como potência, tipo de combustível e frequência de abastecimento. O SMR em estudo 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. Em um iPWR, o pressurizador está localizado no topo do vaso do reator; esta configuração envolve mudanças técnicas como, por exemplo, alteração no mecanismo de circulação adotado para a homogeneização das concentrações de Boro. Assim, o presente trabalho representa uma contribuição para a concepção de uma instalação experimental planejada para fornecer dados relevantes para estudar os fenômenos de homogeneização de Boro no pressurizador de um reator modular compacto. Para isso, foi montada uma instalação experimental com uma seção de teste em aço inoxidável com escala de 1:200, referente a $\frac{1}{4}$ do pressurizador de um iPWR. Trabalhos anteriores determinaram os principais parâmetros para a construção de um modelo em escala reduzida para análise de dispersão de Boro no pressurizador de um reator com a configuração integral. Esses parâmetros, como medidas dos orifícios e vazão de circulação, foram a base para a execução do projeto referente a montagem experimental. Além da seção de teste, a instalação experimental dispõe de duas bombas rotativas, 5 medidores de vazão e 3 tanques em aço inoxidável, com capacidades de, aproximadamente, 70, 143 e 216 litros. A montagem foi realizada de modo que a seção de teste fosse alimentada com água ou com uma solução com concentração diferente, representando cenários de boração ou deboração. Para determinar a concentração na entrada e na saída da seção de teste, foram realizadas coletas de amostras, a cada 10 minutos, durante os experimentos que representavam alguns cenários (boração/deboração). Utilizando um condutivímetro de bancada, a condutividade elétrica dessas amostras foi determinada e convertida em concentração do elemento traço utilizado. Após a montagem, com as devidas instalações, testes de operação e execução dos experimentos, foi possível comprovar a viabilidade de empregar a montagem experimental, de maneira confiável, para obter valores que possam analisar o fenômeno de homogeneização de Boro em um pressurizador de um reator modular compacto.

Palavras-chave: SMR; iPWR; pressurizador; Boro; montagem experimental.

IMPLEMENTING A TEST FACILITY IN REDUCED SCALE FOR ANALYSIS OF BORON DISPERSION IN A PRESSURIZER A REACTOR COMPACT AND MODULAR INTEGRAL

Author: **Samira Ruana Vidal do Nascimento**

Internal advisor: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

External advisor: Prof. Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa

ABSTRACT

The *Small Modular Reactors*, SMRs, are compact variants modular reactors of generation III + reactors that feature attractive features such as simplicity, enhanced security and are economically competitive. Currently, there are many SMRs projects with distinct structural characteristics such as power, fuel type and supply frequency. The SMR in the study, is a PWR (pressurized water reactor) reactor type that integrated (iPWR). This system is characterized by the inclusion of the entire primary system inside the pressure vessel, including a steam generator and the pressurizer. In one iPWR, the pressurizer is located at the top of the reactor vessel; this configuration change involves techniques such as, for example, change in the movement mechanism adopted for the mixing of boron concentrations. The present work is a contribution to the design of an experimental installation designed to provide relevant data to study the boron homogenization phenomena pressurizer in a compact modular reactor. For this, we assembled an experimental installation with a test section in stainless steel with scale of 1:200, referring to $\frac{1}{4}$ of the pressurizer of a iPWR. Previous work has determined the key parameters for the construction of a small-scale model for analysis boron dispersion in a reactor pressurizer with the full configuration. These parameters, such as measures of circulation orifices and flow were the basis for the implementation of the design related to the experimental setup. In the test section, the experimental apparatus has two rotary pumps, 5 flow meters and 3 stainless steel tanks with capacities of approximately 70, 143 and 216 liters. The fitting was performed so that the test section was fed with water or a solution with different concentration, or boration scenarios representing deboration. To determine the concentration at the inlet and outlet of the test section, samples have been collected every 10 minutes during the experiments representing some scenarios (boration/deboration). Using a benchtop conductivity, the electrical conductivity of these samples was determined and converted to the concentration of the trace element used. After assembly, with the operation testing and execution of experiments, it was possible to prove the viability of using the experimental setup, reliably, for values that can analyze the boron homogenization phenomenon in a pressurizer of a compact modular reactor.

Key words: SMR; iPWR; pressurizer; boron; test facility.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Vaso de pressão de um reator PWR.	25
Figura 2 – Esquema da disposição dos componentes de um reator PWR.	26
Figura 3 – Pressurizador de um PWR.	27
Figura 4 – Comparação entre a configuração e dimensão do circuito primário de um PWR convencional e do vaso com uma configuração integral.	28
Figura 5 – Configuração do vaso de pressão do IRIS.	30
Figura 6 – Pressurizador do IRIS.	31
Figura 7 – Reatividade e concentração média de Boro no núcleo em função do tempo.	36
Figura 8 – Seção de teste ROCOM.	38
Figura 9 – Esquema da montagem experimental implantada no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN/NE).	43
Figura 10 – Seção de testes (ST) em aço inox.	44
Figura 11 – Vaso de homogeneização (VH).	45
Figura 12 – Bomba rotativa de sucção (BR-1).	45
Figura 13 – Inversor de frequência WEG.	46
Figura 14 – Bomba rotativa de sucção (BR-2).	47
Figura 15 – Medidor de vazão do tipo eletromagnético.	47
Figura 16 – Medidor de vazão do tipo mássico.	48
Figura 17 – Tanque de diluição (TD).	49
Figura 18 – Tanque de boração (TB).	49
Figura 19 – Tanque de armazenamento (TA).	50
Figura 20 – Amostra da tubulação em aço inoxidável utilizada na instalação experimental. ...	51
Figura 21 – Conexões em aço inoxidável da HOKE GYROLOK.	51
Figura 22 – Válvula agulha da HOKE GYROLOK.	51
Figura 23 – Válvula esfera da HOKE GYROLOK.	51
Figura 24 – Montagem experimental implantada no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN/NE).	52
Figura 25 – Esquema da montagem experimental durante a primeira etapa da operação teste.	54

Figura 26 – Esquema da montagem experimental durante a segunda etapa da operação teste.	55
Figura 27 – Esquema da montagem experimental durante operação teste com a inserção da válvula de retenção (V-20).	56
Figura 28 – Esquema da instalação experimental após a operação teste.....	58
Figura 29 – Condutivímetro microprocessado de bancada, de marca QUIMIS.....	60
Figura 30 – Balança de precisão, de marca OHAUS.	60
Figura 31 – Condutivímetro microprocessado de bancada, da marca CELTAC.	62
Figura 32 – Esquema da montagem experimental durante o experimento 01.....	63
Figura 33 – Esquema da montagem experimental durante o experimento 02.....	65
Figura 34 – Esquema da montagem experimental durante o experimento 03.....	67
Figura 35 – Esquema da montagem experimental durante o experimento 04.....	68
Figura 36 – Vazão volumétrica em função da frequência da bomba BR-1.....	70
Figura 37 – Vazão volumétrica média em função da frequência da bomba BR-1.	71
Figura 38 – Condutividade elétrica da solução de Ácido Bórico em água destilada em função concentração de Ácido Bórico na solução.....	72
Figura 39 – Condutividade elétrica da solução de Cloreto de Sódio em água destilada em função concentração de Cloreto de Sódio na solução.	74
Figura 40 – Condutividade elétrica em função concentração de NaCl.	75
Figura 41 – Concentração média na entrada e na saída da seção de teste, mais ou menos o desvio padrão experimental em função do tempo, determinada durante o experimento 01.....	76
Figura 42 – Concentração média mais ou menos o desvio padrão experimental em função do tempo, determinada durante o experimento 02.	77
Figura 43 – Concentração média na saída em função do tempo, determinada durante o experimento 02.	77
Figura 44 – Concentração em função do tempo durante o experimento 02, determinada a partir do desenvolvimento teórico, experimental e pela curva de ajuste.	79
Figura 45 – Concentração média em função do tempo, determinada durante o experimento 03.	80
Figura 46 – Concentração média na saída em função do tempo, determinada durante o experimento 03.	80
Figura 47 – Concentração em função do tempo durante o experimento 03, determinada a partir do desenvolvimento teórico, experimental e pela curva de ajuste.	81

Figura 48 – Concentração média em função do tempo, determinada durante o experimento 04.	82
Figura 49 – Concentração média na saída da seção de teste em função do tempo, determinada durante o experimento 04.	83
Figura 50 – Concentração em função do tempo durante o experimento 04, determinada a partir do desenvolvimento teórico e experimental.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – SMRs oferecidos pela indústria nuclear.	21
Tabela 2 – Parâmetros do vaso do IRIS.	30
Tabela 3 – Principais parâmetros do IRIS e da seção de testes.	34
Tabela 4 – Medida condutividade elétrica de amostras de água.	61
Tabela 5 – Concentração (em ppm) de Ácido Bórico em água destilada e o valor médio e desvio padrão experimental da condutividade elétrica(em $\mu\text{S}\backslash\text{cm}$).	72
Tabela 6 – Concentração (em ppm) de Cloreto de Sódio em água destilada e o valor médio e desvio padrão experimental da condutividade elétrica (em $\text{mS}\backslash\text{cm}$).	73
Tabela 7 – Parâmetros utilizados nos experimentos 02, 03 e 04.	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABDAN - Associação Brasileira para o Desenvolvimento de Atividades Nucleares
- AOO - *Anticipated Operational Occurrences*
- BR - Bomba Rotativa
- CFD - *Computational Fluid Dynamics*
- CNAAA - Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
- CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
- CRCN/NE - Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste
- CVCS - *Chemical and Volume Control System*
- H₃BO₃ - Ácido Bórico
- IAEA - *International Atomic Energy Agency*
- IEN - Instituto de Engenharia Nuclear
- iPWR - *Integrated Pressurized Water Reactor*
- IRIS - *International Reactor Innovative and Secure*
- MV - Medidor de Vazão
- NaCl - Cloreto de Sódio
- PIV - *Particle Image Velocimetry*
- SBLOCA - *Small Break Loss-of-Coolant-Accident*
- SIN - Sistema Interligado Nacional
- SIS - Sistema de Injeção de Segurança
- SMR - *Small Modular Reactor*
- ST - Seção de teste
- TA - Tanque de Armazenamento
- TB - Tanque de Boração
- TC - Trocador de Calor
- TD - Tanque de Diluição
- V - Válvula
- VH - Vaso de Homogeneização

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Motivação do trabalho	17
1.2. Objetivos do trabalho	19
2. REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 SMR – <i>Small Modular Reactors</i>	20
2.2 iPWR.....	23
2.2.1 PWR convencional	24
2.2.2 Pressurizador em um PWR convencional	26
2.2.3 Vaso de pressão de um PWR com a configuração integral	28
2.4. Pressurizador do iPWR.....	30
2.3 Eventos de diluição de Boro.....	35
2.4 Determinação da concentração de Boro na literatura	37
2.5 Técnica para a medida da concentração	40
2.5.1. Condutividade elétrica.....	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 Descrição geral da montagem experimental	42
3.2 Operação teste da montagem experimental	53
3.3 Procedimentos experimentais	59
3.3.1 Vazão volumétrica em função da frequência de rotação da bomba BR-1.....	59
3.3.2 Teste realizado com um condutímetro de bancada.....	59
3.3.3 Curva de calibração da condutividade elétrica em função da concentração de NaCl 61	
3.3.4 Experimento 01.....	63
3.3.5 Experimento 02.....	65
3.3.6 Experimento 03.....	66
3.3.7 Experimento 04.....	67
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1 Vazão volumétrica em função da frequência de rotação da bomba BR-1	70
4.2 Teste realizado com um condutímetro de bancada	71

4.3	Curva de calibração da condutividade elétrica em função da concentração de NaCl	74
4.4	Experimento 01	75
4.5	Experimento 02	76
4.6	Experimento 03	79
4.7	Experimento 04	82
4.8	Comparação entre os experimentos 02, 03 e 04	84
5.	CONCLUSÃO	86
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A – VALORES TEÓRICOS DA CONCENTRAÇÃO	94

1. INTRODUÇÃO

Cerca de 10 % da eletricidade comercial no mundo é fornecida a partir da energia nuclear (GLASER et al., 2015). Neste contexto, 438 centrais nucleares estão em operação e 67 plantas em fase de construção (IAEA, 2015). Segundo a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA - *International Atomic Energy Agency*), as projeções apontam para um crescimento entre 8% e 88% na capacidade de energia nuclear até o ano de 2030. Isso se deve ao crescimento da população e da demanda por eletricidade, ao reconhecimento das contribuições de energia nuclear na redução das emissões de gases com efeito estufa, à importância de segurança do abastecimento energético e à volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis. Desse modo, a energia nuclear desempenha um papel importante no cenário energético a longo prazo (IAEA, 2015).

No Brasil, a matriz de energia elétrica é predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica, 65,2 % (EPE, 2015). Apesar dessa matriz apresentar grandes vantagens para produzir eletricidade, a natureza essencialmente hídrica tem colocado em risco o Sistema Interligado Nacional¹, comprometendo a segurança energética com a imprevisibilidade das condições climáticas (ABDAN, 2014).

No setor nuclear, o Brasil dispõe de uma central nuclear, a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAEA), com duas usinas nucleares em operação e uma em construção. Estão em operação as usinas Angra 1, com capacidade para geração de 640 MWe, e Angra 2, com 1350 MWe. Essas duas usinas são responsáveis por 2,5 % da geração de eletricidade no Brasil, que corresponde a um terço da energia do Estado do Rio de Janeiro (EPE, 2015). Angra 3 será praticamente uma réplica de Angra 2 (incorporando os avanços tecnológicos ocorridos desde a construção de Angra 2) e está prevista para gerar 1405 MWe, com previsão de término para 2018. O Brasil detém uma das maiores reservas globais do mineral que figura como fonte primária do combustível nuclear, o Urânio. Além disso, domina todo o ciclo de fabricação do combustível nuclear, que corresponde ao processo industrial que processa o Urânio, desde sua extração até a produção das pastilhas de Dióxido de Urânio (UO₂).

O interesse de retomar a obra de Angra III veio com a crise no abastecimento de eletricidade, em 2001. Devido às poucas chuvas, falta de planejamento e ausência de investimentos em geração e transmissão de energia (BRASIL, 2007). Além disso, o Brasil tem

¹ O Sistema Interligado Nacional, SIN, é um sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 1,7% da energia requerida pelo país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica (ONS, 2015).

um baixo consumo per capita de eletricidade (2.545 kWh/hab/ano) e precisará produzir grandes quantidades de energia nos próximos anos, para atingir o patamar mínimo de 6.000 kWh/hab/ano, sendo a energia elétrica oriunda da energia nuclear uma das alternativas mais viáveis (ABDAN, 2014). Nesse cenário, o Plano Nacional de Energia 2030 recomenda, além de Angra III, a construção de mais usinas (BRASIL, 2007).

Durante as últimas quatro décadas, houve um aumento na potência dos reatores de algumas centenas de MWe para 1500 MWe (LOCATELLI; BINGHAM; MANCINI, 2014). Entretanto, surge uma nova discussão, do ponto de vista econômico, referente a escolha de um reator de “grande” ou “pequeno” porte. Segundo o princípio de economia de escala, o custo capital de um reator de pequeno porte é superior ao custo de um reator de grande porte. Esse conceito vem sendo considerado simplista e não é totalmente aplicável (LOCATELLI; BINGHAM; MANCINI, 2014).

De acordo com a classificação da IAEA, os reatores de pequeno e médio porte correspondem aos reatores entre 250 e 700 MW. Atualmente o termo “*small*” tem sido utilizado para reatores com capacidade menor que 300 MW, os *Small Modular Reactors*, ou SMRs (GLASER et al., 2015; LOCATELLI; BINGHAM; MANCINI, 2014). O termo “*modular*”, refere-se aos seguintes fatores: (i) um único reator pode ser agrupado com os outros para formar uma grande planta nuclear; e (ii) seu projeto é constituído principalmente por módulos pré-fabricados que são montados no local (LOCATELLI; BINGHAM; MANCINI, 2014).

Dentre as vantagens apresentadas por esses reatores, podem ser destacadas: (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 (LOCATELLI; BINGHAM; MANCINI, 2014).

Diversos projetos de SMRs estão atualmente em diferentes estágios de desenvolvimento ao redor do mundo. Estes projetos variam em sua potência, tamanho físico, tipo de combustível, a frequência de reabastecimento, e estado de desenvolvimento (GLASER et al., 2015). Alguns desses reatores apresentam uma configuração integral, ou seja, todos os componentes do sistema primário, como bombas, geradores de vapor, pressurizador e mecanismo de acionamento das barras de controle são acondicionados no vaso de pressão. Nessa

configuração, conhecida como iPWR (*Integrated Pressurized Water Reactors* - Reator de Água Pressurizada Integral), o pressurizador está posicionado na parte superior do vaso do reator, acima dos mecanismos de acionamento das barras de controle (BOTELHO et al., 2008). Quando comparado com pressurizadores tradicionais, os pressurizadores dos iPWRs apresentam um amplo volume, possibilitando acomodar maior quantidade de vapor e, como consequência, abrandam os aumentos de pressão no circuito primário (CARELLI, 2003). A água do pressurizador de um iPWR encontra-se separada da água sub-resfriada do circuito primário por meio de uma estrutura interna com o formato de “chapeu invertido”. Essa estrutura fornece um isolamento térmico capaz de manter saturada a água no interior do pressurizador (BARROSO et al., 2003; BOTELHO et al., 2005; CARELLI, 2003; CARELLI et al., 2004; POPOV; YODER, 2008). Os aquecedores elétricos do pressurizador são projetados para gerar água saturada e vapor suficiente para prevenir a queda de pressão em casos de excesso de demanda de potência nas turbinas.

1.1. Motivação do trabalho

Nos últimos anos, houve um aumento nos estudos sobre os eventos da diluição de Boro que poderiam levar a transientes de reatividade (HERTLEIN et al., 2003). Para auxiliar o controle da reatividade no núcleo do reator, uma solução de Ácido Bórico é normalmente adicionada ao refrigerante. Entretanto, tal método 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, 2008). Para investigar esse comportamento, dados espaciais e temporais são obtidos por meio de modelos computacionais com códigos CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e análises experimentais, permitindo, assim, uma descrição confiável desse comportamento (KIGER; GAVELLI, 2001).

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. Nesse sentido, Silva

(2008) desenvolveu condições sob as quais uma seção de testes em escala reduzida pudesse ser construída para análise de dispersão de Boro no pressurizador do reator IRIS². A utilização de modelos com dimensões reduzidas tornou-se uma opção eficiente na resolução de problemas estruturais diante dos elevados custos para desenvolver estruturas apresentando a mesma dimensão que a do projeto real. Os principais parâmetros obtidos por Silva (2008) foram medidas de: orifícios de recirculação, temperatura de entrada na seção de testes, fator de escala temporal e da vazão de recirculação na seção de testes. Esses parâmetros foram determinados através da combinação de uma metodologia de similaridade conhecida como Análise de Escala Fracional e de uma similaridade local do número de Froude densimétrico e um fator de escala volumétrica previamente estabelecido (SILVA et al., 2010). Além da redução dos custos, a utilização desse modelo em escala reduzida permite analisar o comportamento de deborçamento e boração em um intervalo de tempo bem menor e com um volume duzentas vezes menor que em um protótipo do IRIS (SILVA et al., 2010).

Após a obtenção desses parâmetros, foi construída uma bancada experimental simplificada de baixa pressão em escala reduzida representando $\frac{1}{4}$ do pressurizador do IRIS Bezerra (2012). Essa bancada foi montada no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE), órgão vinculado à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) em Recife (PE). Para simular alguns desses parâmetros, utilizou-se uma seção de testes fabricada em acrílico transparente e um corante a fim de investigar o comportamento da diluição do Boro (BEZERRA et. al., 2013a). O pioneirismo na construção experimental do pressurizador do IRIS permitiu a obtenção de valores preliminares sobre homogeneização do Boro (BEZERRA et. al., 2013b). Entretanto, algumas modificações na estrutura da bancada experimental podem proporcionar a obtenção de informações mais precisas da evolução da concentração de Boro em função de vários parâmetros de interesse, garantindo a similaridade entre o sistema original e o modelo em escala reduzida.

² O IRIS (*International Reactor Innovative and Secure*) foi um projeto de um reator de água pressurizada, modular, com uma configuração integral. O projeto do IRIS foi produto de uma parceria entre a Companhia *Westinghouse* e cerca de dezenove organizações, que envolvia dez países, inclusive o Brasil. Esse projeto acabou, mas o design desse reator é semelhante aos SMRs do tipo iPWR (PETROVIC et al., 2012; CARELLI; INGERSOLL, 2014).

1.2. Objetivos do trabalho

Como parte de um projeto desenvolvido pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em parceria com o Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE) e o Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN-RJ), o objetivo ao realizar esse trabalho foi montar e implementar uma montagem experimental que corresponda aos parâmetros sugeridos por Silva (2008), garantindo a similaridade entre o sistema original e o modelo experimental em escala reduzida.

Dentre os objetivos específicos, pretende-se: (i) instalar um circuito hidráulico que alimente a seção de teste; (ii) instalar medidores de vazão precisos de modo a determinar a vazão volumétrica na entrada e saída da seção de teste; (iii) instalar dois tanques que permitam alimentar a seção de teste com concentrações diferentes de um elemento traço, criando cenários que representem uma borração/deborração; e (iv) instrumentar a unidade experimental. A consolidação da instalação foi realizada através de testes que visam verificar a operacionalidade e identificar possíveis limitações da instalação experimental.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SMR – *Small Modular Reactors*

Os *Small Modular Reactors* são reatores de pequeno porte. O termo “*small*” refere-se à potência nominal do reator, que, atualmente, é adotada entre 10 e 300 MWe (GLASER et al., 2015). A faixa mínima garante que o reator proporcione potência adequada para uma aplicação industrial de interesse, já a classificação máxima restringe os projetos para níveis de potência em que existam vantagens na produção em série e implantação para realização do projeto (CARELLI; INGERSOLL, 2015). 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).

A proposta da construção de reatores compactos não é uma proposta inovadora. Historicamente, os primeiros reatores destinados à produção comercial de eletricidade apresentavam tamanho pequeno. Essa proposta era uma consequência do processo prudente de engenharia. A construção de plantas a partir de pequeno porte, permitia adquirir experiência operacional necessária para mover com confiança para construções maiores (CARELLI; INGERSOLL, 2015). Após meio século de experiência, reatores civis comerciais estão sendo implantados com classificações de até 1660 MWe. Além disso, as pequenas unidades foram construídas para: (i) fornecer energia elétrica em implantações terrestres e instalações militares vulneráveis; (ii) implantações no oceano em submarinos de propulsão, navios militares e comerciais; e (iii) em aeronaves à propulsão. As técnicas de construção modular, historicamente, também têm sido utilizadas para a produção em série de produtos selecionados. No entanto, o que é novo é a visão de pequenos reatores de potência dimensionados compostos por um único ou vários módulos dimensionados para mercados de redes elétricas de pequeno ou grande porte, criando assim novos locais de produção nuclear, que exigem investimentos de capital significativamente reduzidos e taxas de investimento de capital. A premissa mais

econômica é que o custo de geração elétrica pode ser feita suficientemente comparável com o das plantas de grande porte existentes empregando uma estratégia de economia de números (fabricação de múltiplos módulos idênticos) e simplificação da concepção tradicional versus a economia de escala (CARELLI; INGERSOLL, 2015; LOCATELLI et al., 2014).

Atualmente, todas as tecnologias de refrigeração exploradas para reatores nucleares de maior dimensão apresentam uma oferta explícita de centrais elétricas modulares de tamanho reduzido. Na Tabela 1, são apresentados os SMRs oferecidos pela indústria nuclear.

Tabela 1 – SMRs oferecidos pela indústria nuclear.

Reatores	Potência (MWe)	País	Fornecedor
PWRs refrigerados a água leve			
ACP 100	100	China	CNNC/Guardian
CAREM	27-100	Argentina	CNEA/INVAP
FLEXBLUE	160	França	Grupo DCNS
KLT-40 S	35	Rússia	OKBM
mPower Reactor	125	EUA	Babcock e Wilcox (B & W) / Bechtel Corporation
NuScale Reactor	45	EUA	NuScale Power Inc. / Fluor
SMART	100	Coreia do Sul	KAERI
SMR-160	160	EUA	Holtec
Westinghouse SMR	> 225	EUA	Westinghouse
BWR refrigerado a água leve			
VK-300	300	Rússia	RDIPE ou NIKIET
HWR refrigerado a água pesada			
PHWR	200	Índia	Nuclear Power Corporation of Índia, Ltd
Refrigerado a gás			
Antares	250	França	AREVA
EM 2	240	EUA	General Atomics
HTR-PM	2 x 105	China	INET/Huaneng
Refrigerado a sódio			
PRISM	311	EUA	General Electric-Hitachi (GEH)
GEN4 Module	25	EUA	Gen4 Energy, Inc. (formerly Hyperion)

4S (Super Safe, Small, Simple)	10	Japão	Toshiba
Refrigerado a chumbo			
BREST	300	Rússia	RDIPÉ
SVBR-100	100	Rússia	AKME-engineering (Rosatom/Euro DIB Enero)

Fonte: CARELLI, INGERSOLL (2015).

Para criar alguma coerência fora desta variedade, alguns autores agrupam esses reatores modulares compactos em quatro categorias ou "famílias". Essas categorias são distinguidas pelo principal objetivo que norteia a concepção do reator, em vez de, por exemplo, por alguma característica do sua tecnologia como seu combustível ou refrigerante. As quatro categorias apresentadas por Glaser et al. (2015) são reatores: (i) prontos para construir; (ii) que sucedem o *Second Time Around*; (iii) reduzem a carga de resíduos nucleares; e (iv) vem com combustível para uma vida.

A primeira família de SMRs envolve projetos de reatores que são guiados pela ideia de demonstrar a viabilidade de SMRs, aproveitando as vantagens apresentadas por serem do primeiro mercado. Uma razão de serem considerados mais próximo de serem comercializados é porque esses reatores são do tipo PWR, que é o tipo predominante de tecnologia de reator nuclear. Reatores da primeira família dominam a discussão de pequenos reatores modulares hoje. As outras três classes de reatores envolvem pequenos reatores modulares que têm poucos homólogos entre grandes reatores comerciais atuais ou nenhum (GLASER et al., 2015). Dentre os reatores que pertencem a essa família, podem ser citados: ACP-100, SMART, NuScale, mPower e CAREM.

A segunda família de SMRs é fundamentalmente baseada em modelos diferentes dos reatores de água leve, mas inclui apenas reatores que foram avaliados extensivamente no passado. Estes não foram considerados ativos após a década de 1970, quando o mundo em grande parte convergiu para reatores de água leve como uma classe de tecnologia padrão. Dois importantes conceitos de reatores nesta categoria destacam-se: reatores leito de bolas e reatores de sal fundido (GLASER et al., 2015). Os SMRs dessa família são HTR-PM e o IMSR.

A eliminação de resíduos nucleares continua sendo uma das questões chave que afetam a discussão da energia nuclear no debate público e político. Vários conceitos de SMRs colocam a questão de resíduos nucleares à frente. Eles são apresentados como tecnologias que podem gerar energia, reduzindo o problema dos resíduos por "queima" (ou "transmutação") em vários

isótopos existentes de combustível irradiado (GLASER et al., 2015). Os SMRs que apresentam essas características compõem a terceira família, são eles: PRISM, EM2, Travelling Wave Reactor e o WAMSR.

Há uma forte discussão sobre o futuro da energia nuclear, sobre um reator que não exigiria reabastecimento no local durante toda a sua vida comercial (talvez 30 anos). Sendo uma motivação importante para o apoio do governo norte-americano para o conceito de SMR no início de 2000. Na época, havia muito otimismo com relação a uma rápida expansão global da energia nuclear, mas havia também preocupações sobre o acoplamento da energia nuclear para armas nucleares. Os reatores que dispõem de combustível para uma vida são os reatores que compõem a quarta família. Podem ser citados: 4S, G4M e AFPR-100.

2.2 iPWR

Os reatores de água pressurizada com configuração integral, (iPWRs) são usados em submarinos de propulsão nuclear; isso não é muito conhecido, mas o primeiro iPWR comercial foi posto em utilização antes de 1964. Foi um navio alemão de carga a propulsão nuclear utilizado para testar a viabilidade da energia nuclear na função pública, o *Otto Hahn* (CARELLI; INGERSOLL, 2015). O primeiro iPWR terrestre proposto foi o PIUS (*Process Inherent Ultimate Safety*), reator Sueco que foi concebido, por volta de 1980, como resposta ao acidente de *Three Mile Island*, com o objetivo de substituir o sistema ativo de segurança por um sistema de segurança inerente. Consistia essencialmente de um reator com uma piscina de água borada e um vaso de pressão de concreto no subsolo, resfriando o núcleo por circulação natural (CARELLI; INGERSOLL, 2015). Um verdadeiro iPWR foi proposto em meados dos anos 80, a MAP (*Minimum Attention Plant*). Um reator de água leve auto-pressurizado com plena circulação natural e vários geradores de vapor de passagem única localizados dentro do vaso do reator. A MAP foi eventualmente arquivado pela multinacional *Combustion Engeneering* em favor do SIR (*Safe Integral Reactor*), desenvolvido no final dos anos 80. SIR foi o iPWR com desenho desenvolvido no início dos anos 90 e continua sendo desenvolvido ao redor do mundo, mais notavelmente na Rússia, Argentina, República da Coreia, Japão e China (CARELLI; INGERSOLL, 2015).

Para elucidar a configuração integral nos projetos dos reatores modulares compactos, inicialmente é apresentada a disposição dos componentes que constituem um reator de água pressurizada, o PWR convencional.

2.2.1 PWR convencional

Nos reatores de água pressurizada (*Pressurized Water Reactor*, PWR), a água é submetida à pressão de aproximadamente 15 Mpa, e utilizada como moderador de nêutrons e como refletor (MURRAY, 2009). 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 (LAMARSH; BARATTA, 2001). 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 zircaloy³. 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; MURRAY, 2009).

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 (MURRAY, 2009).

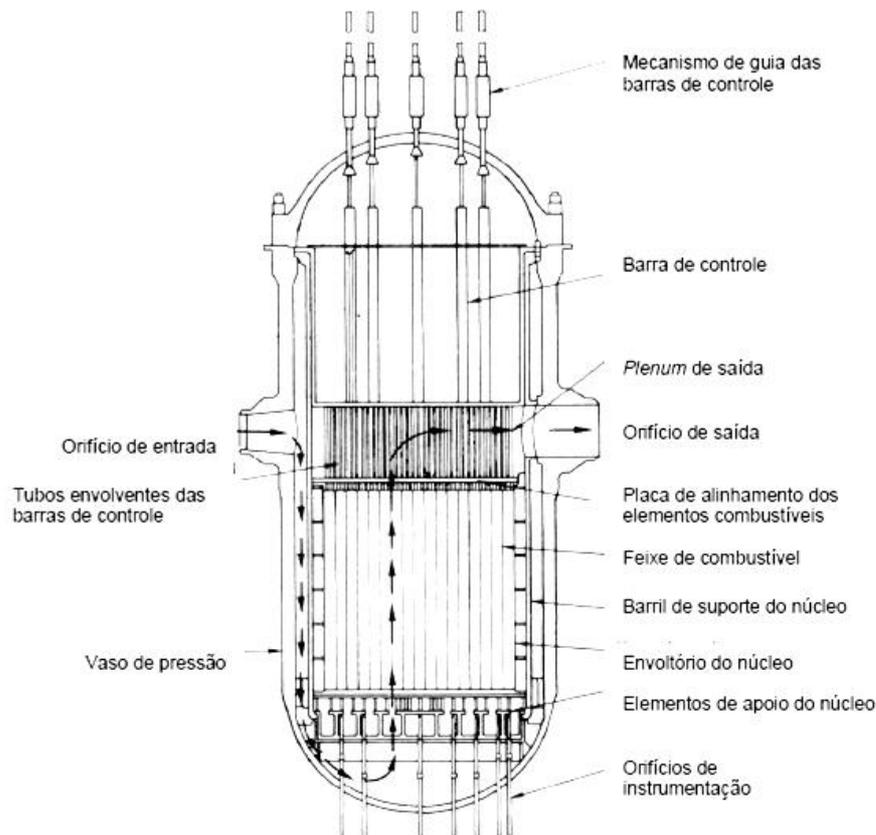
A quantidade de nêutrons absorvidos é determinada pelos seguintes fatores: (i) ajuste das barras de controle; (ii) inserção de Ácido Bórico (H_3BO_3). As barras de controle, constituídas de uma liga de Prata, Cádmiio e Índio, são conectadas magneticamente. Com a interrupção da corrente magnética, as barras entram no núcleo através da força da gravidade sendo inseridas em alguns espaços vazios do elemento combustível. O H_3BO_3 absorve maior quantidade de nêutrons em virtude de sua proporção de átomos de Boro (MURRAY, 2009). De modo geral, o Boro é o mais comum (e econômico) absorvedor de nêutrons. Seu amplo espectro

³ Zircaloy é uma liga de zircônio, contendo pequenas quantidades de estanho, ferro, cromo e níquel.

de absorção torna-o também adequado para uma blindagem de nêutrons (ARIAS, 2009). Nos últimos anos, a análise de segurança tem visado os chamados “eventos de diluição de Boro” que podem potencialmente conduzir para transientes de reatividade. Há estudos cuja finalidade é investigar a diluição do Boro em PWRs (HYVARINEN, 1993; SUN; SHA, 1995; KLIEM et al., 2008; DURY et al., 2008; HOHNE et al., 2008; FREIXA et al., 2009).

Em um PWR, a água entra no vaso de pressão a uma temperatura por volta de 290 °C e escorre para baixo em torno do núcleo, passando para cima através do núcleo, onde é aquecida, saindo do vaso com uma temperatura de aproximadamente 325 °C. Os elementos que compõem o vaso de um reator PWR são ilustrados na Figura 1.

Figura 1 – Vaso de pressão de um reator PWR.



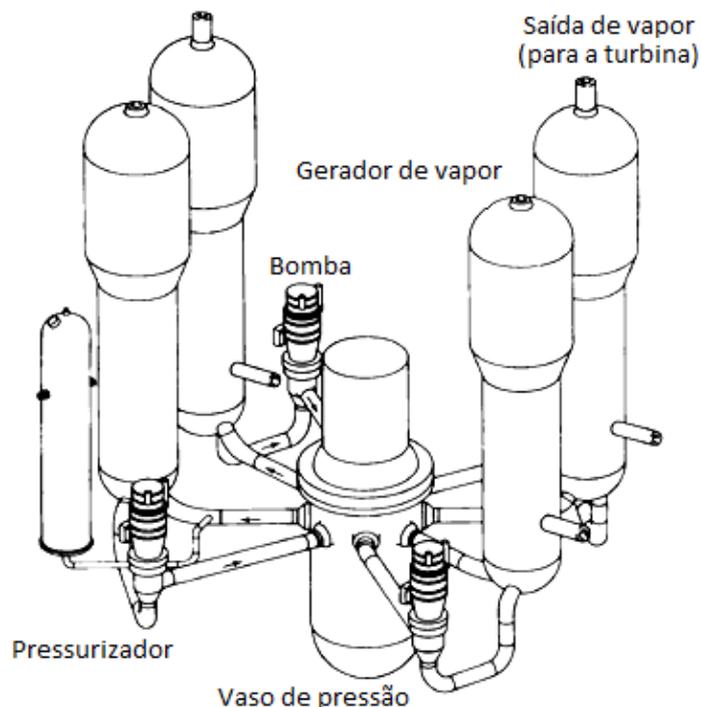
Fonte: adaptado de LAMARSH; BARATTA, 2001.

Como a água possui baixa compressibilidade, qualquer mudança no volume do refrigerante pode conduzir a uma mudança na pressão, que pode provocar efeitos indesejados ao sistema. Se, por alguma razão, o volume do refrigerante diminuir, uma queda subsequente na pressão pode resultar na vaporização da água no reator, que, por sua vez, pode conduzir a fusão completa do elemento combustível. Para evitar que isso aconteça, o circuito primário de

um PWR é equipado com um reservatório que tem como finalidade manter a pressão, conhecido como pressurizador (LAMARSH; BARATTA, 2001).

Na maioria das vezes, um reator PWR possui de dois a quatro circuitos primários conectados a um circuito secundário. Em cada circuito primário há um gerador de vapor e uma bomba para circulação de água. Em um dos circuitos há um pressurizador e um sistema de refrigeração de emergência do núcleo. Na Figura 2 é apresentado um esquema da disposição dos componentes do reator PWR. Nesse esquema, há quatro bombas de refrigeração, uma para cada ciclo de refrigeração, mas apenas um pressurizador para todo o 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.

Figura 2 – Esquema da disposição dos componentes de um reator PWR.



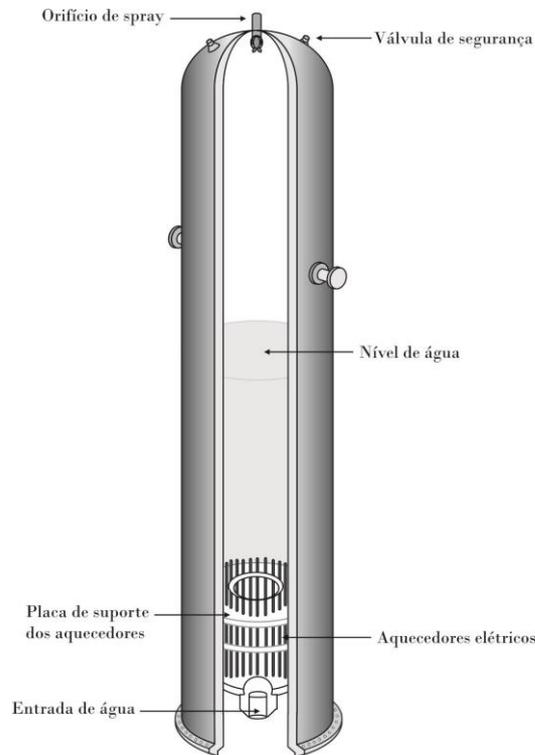
Fonte: adaptado de LAMARSH; BARATTA, 2001.

2.2.2 Pressurizador em um PWR convencional

O pressurizador é um componente importante nos PWRs, sendo responsável pelo controle da pressão no circuito primário (CHENG, et al., 2009; SILVA et al., 2011). Ele mantém o núcleo em um nível sub-resfriado, evitando que o combustível seja exposto a situações perigosas. Um pressurizador, representado na Figura 3, 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. Dentro do pressurizador há vapor, na região superior, e líquido, na parte inferior.

Figura 3 – Pressurizador de um PWR.



Fonte: adaptado de LAMARSH; BARATTA, 2001.

Conforme apresentado na Figura 3, o orifício de *spray* é posicionado no topo do reservatório que, por sua vez, é acionado quando houver a necessidade de reduzir a pressão através da condensação do vapor (*insurges*). Geralmente o aumento da pressão é decorrente de situações transitórias ocasionadas por eventos de aquecimento do circuito primário como, por exemplo, queda de potência das turbinas, que acarreta um aumento do volume do refrigerante e, conseqüentemente, o nível de água no pressurizador. Quando a temperatura do refrigerante no sistema primário é diminuída, há uma queda de pressão (*outsurge*) que propicia a vaporização instantânea da água. Nesse caso, a diminuição da pressão é atenuada pelo aumento na potência dos aquecedores elétricos alocados na base do pressurizador (LAMARSH; BARATTA, 2001).

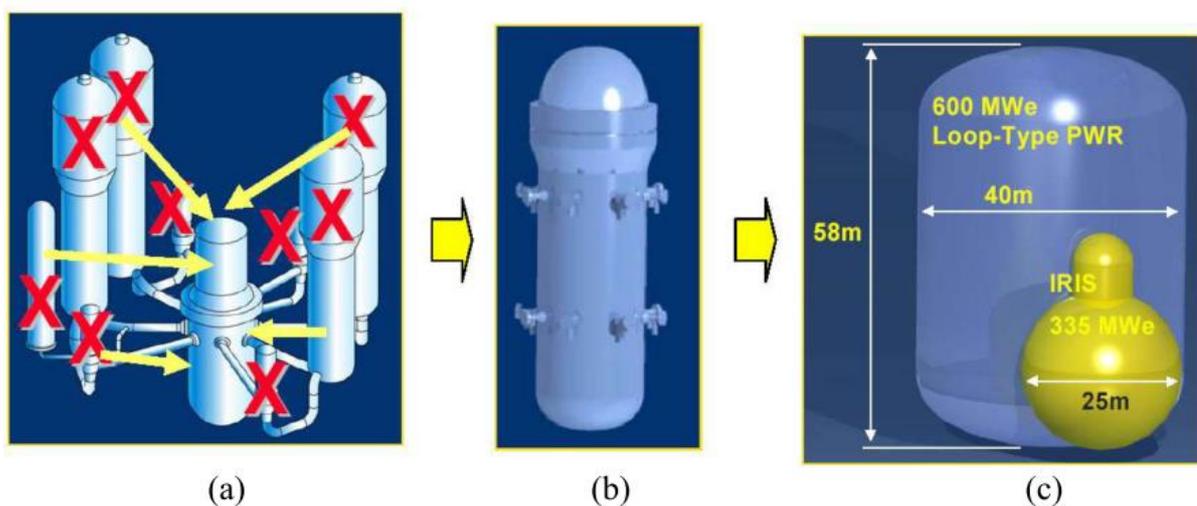
Em um PWR a previsão da pressão durante vários transientes é essencial para operar um reator de forma segura, pois permite decidir quais ações devem ser tomadas para controlar ou reduzir as conseqüências de um acidente. Essa previsão é obtida através de códigos

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, como: (i) a condensação na parede do pressurizador; (ii) a transferência de calor na interface das fases líquida e gasosa; (iii) a mistura do jato frio na entrada com a água quente já presente no pressurizador; (iv) a taxa de transferência de calor entre o líquido e a parede; (v) a transferência de calor na parede; (vi) a vaporização instantânea; e (vii) o efeito dos gases não condensáveis. (KIM; GRIFFITH, 1987).

2.2.3 Vaso de pressão de um PWR com a configuração integral

O vaso de pressão de um PWR com a configuração integral não comporta apenas o combustível nuclear e as barras de controle, mas também os componentes do sistema de refrigeração incluindo 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). Essa redução significativa no tamanho geral da planta do reator, é ilustrada esquematicamente na Figura 4 (CARELLI et al., 2005).

Figura 4 – Comparação entre a configuração e dimensão do circuito primário de um PWR convencional e do vaso com uma configuração integral.



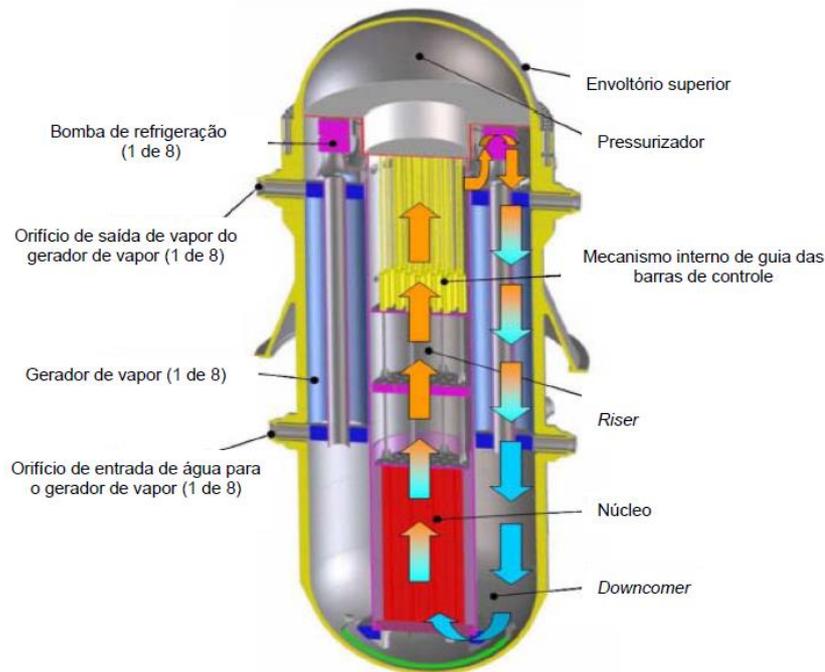
(a) Configuração de um reator PWR convencional; (b) Vaso de pressão de um reator com a configuração integral; (c) Dimensão do edifício de contenção de um PWR convencional e de um reator com a configuração integral.

Fonte: CARELLI et al., 2005.

Nos EUA, o primeiro empenho significativo para a construção de um SMR com uma configuração integral foi o projeto IRIS (*International Reactor Innovative and Secure*), desenvolvido entre 1990 e finalizado em 2009 (CARELLI; INGERSOLL, 2015). O projeto do IRIS foi produto de uma parceria entre a Companhia *Westinghouse* e cerca de dezenove organizações, que envolvia dez países. 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 dissalinizador, o laboratório Brasileiro envolvido foi da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Para a produção de energia, estava a Eletrunuclear, 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.

A configuração do vaso de pressão IRIS, apresentada na Figura 5, consiste em uma casca cilíndrica, uma base inferior semiesférica, e uma estrutura removível dotada de flanges e juntas de vedação na parte superior (WESTINGHOUSE, 2003). O tamanho e a configuração do vaso são ditados pelo espaço necessário para os geradores de vapor e bombas de refrigeração montados no interior do reator. Alguns dos parâmetros adotados para o vaso do reator são apresentados na Tabela 2.

Visando alcançar um projeto com características de segurança inovadoras, o projeto IRIS buscou eliminar iniciadores de eventos que poderiam causar danos ao núcleo. No IRIS, este conceito é implementado através da introdução do “*safety-by-design*”, que pode ser simplesmente descrito como “projeto que busca eliminar acidentes, em vez de lidar com suas consequências”. Se não é possível eliminar certos acidentes completamente, então o projeto reduz as suas consequências e/ou diminui a probabilidade de sua ocorrência (CARELLI et al., 2004). 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. Muitos outros são possíveis, mas eles devem ser cuidadosamente explorados através de um projeto processual que continua focado em selecionar características projetadas que são responsáveis a eliminar eventos responsáveis pelos acidentes (CARELLI et al., 2004).

Figura 5 – Configuração do vaso de pressão do IRIS.

Fonte: adaptado de WESTINGHOUSE, 2003.

Tabela 2 – Parâmetros do vaso do IRIS.

Parâmetros	Configuração
Comprimento total do vaso	22,12 m
Diâmetro da camada interna	2,2 m
Espessura da base de metal	280 mm
Espessura mínima do revestimento	6 mm
Pressão	17,24 MPa (2500 psia)
Temperatura	343,3 °C (650 °F)
Material do vaso	Aço carbono
Material do revestimento	Aço inoxidável

Fonte: WESTINGHOUSE, 2003.

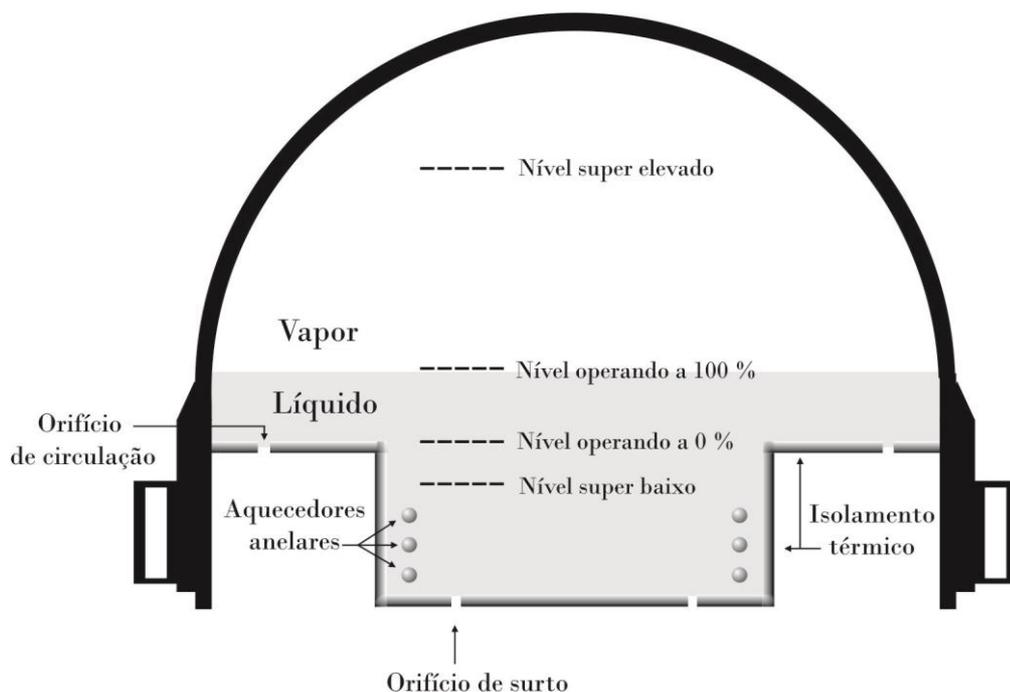
2.4. Pressurizador do iPWR

O pressurizador do iPWR está posicionado na parte superior do vaso integral, acima dos mecanismos interno das barras de controle, ocupando todo espaço superior do vaso. Em um pressurizador, o parâmetro que determina o bom desempenho é a razão entre o volume de vapor

no pressurizador e a potência térmica do reator. Esse parâmetro representa a capacidade do pressurizador reduzir a taxa de aumento de pressão durante os transientes (WESTINGHOUSE, 2003). No pressurizador do IRIS esta razão é 3,4 vezes maior que uma planta convencional com dois laços da *Westinghouse*; 2,7 vezes maior do que o reator avançado AP600; e mais de 5 vezes maior do que o pressurizador do reator AP1000 (BARROSO et al., 2003). Essa razão é suficiente, eliminando a necessidade de um orifício de *spray* (WESTINGHOUSE, 2003). A Figura 6 apresenta a estrutura interna do pressurizador do IRIS. Nessa figura é possível identificar os orifícios de surto, os orifícios de circulação, os aquecedores e as placas responsáveis pelo isolamento térmico. Além disso, há uma representação, indicada por uma linha tracejada, da relação entre o volume de água no pressurizador e a potência na qual o reator está operando.

A parte inferior do pressurizador é fabricada a partir de placas de aço inoxidável austenítico e é soldada na parte superior da extensão da flange. O isolamento térmico é fixado sobre a superfície superior da placa na base. Essa placa tem 8 orifícios de surto que permitem apenas a passagem de água do pressurizador para a estrutura cilíndrica do reator (BARROSO et al., 2003). Para manter a camada de água saturada e produzir vapor suficiente para evitar uma diminuição da pressão durante o aumento na capacidade da planta são usados aquecedores elétricos que estão disponíveis na parte superior do chapéu (WESTINGHOUSE, 2003).

Figura 6 – Pressurizador do IRIS.



Fonte: adaptado de WESTINGHOUSE, 2003.

A água saturada do pressurizador é separada da água sub-resfriada do circuito primário do reator por uma estrutura interna com um formato de chapéu invertido. As funções proporcionadas por essa estrutura são: (i) prevenir que a flange superior e os seus lacres sejam expostos à diferença de temperatura entre a água sub-resfriada e a saturada, reduzindo assim as tensões térmicas e garantido a eficácia da vedação; (ii) proporcionar um isolamento térmico eficaz para minimizar a transferência de calor e manter uma camada de água adequada saturada dentro do pressurizador; (iii) proporcionar um suporte estrutural para as linhas de condução, tubos de instrumentação de núcleos, e aquecedores; e (iv) fornecer a comunicação entre o reator e o pressurizador por meio dos furos de surto (BARROSO et al., 2003; 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).

Nesse sentido, é necessário realizar vários estudos para implementar o pressurizador com esta configuração de modo seguro e eficaz. Um estudo inicial, desenvolvido por Barroso et al. (2003), foi realizado com o objetivo de analisar a viabilidade do projeto do pressurizador do IRIS, sem a necessidade de um orifício de *spray*, transientes que resultam de *insurges* foram simulados por meio de modelos adiabáticos simplificados e por modelos mais realista como o RELAP 5 mod 3.3. Os resultados obtidos foram satisfatórios permitindo prosseguir com o projeto estabelecido previamente. A capacidade de lidar com grandes transientes de *insurge* também foi testada considerando alguns casos como a rejeição de carga integral, 1 s após desligamento e 4 s após a atuação do sistema de emergência passiva para a remoção de calor. A resposta de pressão em todos os casos foi mantida dentro de limites adequados (BARROSO et al., 2003). Nesse estudo, foi possível identificar a maioria dos desafios técnicos dessa evolução. Os resultados obtidos demonstram que o sistema do pressurizador do IRIS, apesar de extremamente simples, é capaz de lidar com os principais transientes normais de funcionamento. Embora extremamente simplificada, as ferramentas numéricas descritas nesse estudo forneceram uma maneira rápida de fazer análise do projeto, que não são simples de ser realizadas com códigos complexos como o RELAP 5.

Posteriormente, foram utilizados os números de similaridade para analisar o comportamento dinâmico do pressurizador do IRIS. Esses números de similaridade utilizam como ponto de partida equações de balanço de massa e energia para as fases líquida e gasosa (BOTELHO et al., 2005). Os algoritmos genéticos utilizados nesse estudo buscam variáveis de modelos de escala em tamanhos reduzidos.

A construção de modelos é uma prática rotineira na engenharia, sendo apoiadas por regras de similaridade, visto que os experimentos em escala são um recurso útil para obter a prova mais acessível de desempenho. Entretanto, uma instalação de teste em tamanho real é, de modo geral, cara e pouco prática. Nesse sentido, a similaridade de protótipos e seus respectivos modelos em escala é uma questão fundamental para o estudo de processos e fenômenos de interesse (SILVA et al., 2010). Um novo método de dimensionar os sistemas, Análise de Escala Fracional, tem sido utilizado com sucesso para analisar variações de pressão, considerando os agentes mais relevantes da mudança.

Silva (2008), através da metodologia de similaridade conhecida como Análise de Escala Fracional, determinou os principais parâmetros, como orifícios de recirculação, temperatura de entrada na seção de testes, fator de escala temporal e da vazão de recirculação na seção de testes, sob as quais uma seção de testes pudesse ser construída para a análise de dispersão de boro no pressurizador do IRIS.

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 $0,25 \text{ m}^3$ 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 $1,7 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ deve ser previsto considerando o modelo do sistema primário com água a uma temperatura próxima a 373 K (60 °C).

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	Policarbonato

Fonte: SILVA, 2008.

A taxa de diluição/borção do reservatório externo e o fluxo no sistema primário no modelo serão iguais a $1,97 \times 10^{-5}$ m³/s e $2,24 \times 10^{-2}$ 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 et al.,2010).

Uma bancada experimental simplificada de baixa pressão em escala reduzida para simulação do pressurizador do IRIS foi construída no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE). Essa bancada foi montada para estudar os processos de diluição e homogeneização do boro, a temperatura ambiente. Foi utilizado um corante com propriedades semelhantes à do ácido bórico em uma seção de testes fabricada em acrílico transparente, que permitiu visualizar a evolução da pluma formada pelo corante ao longo do tempo (BEZERRA, 2012).

Os transitórios de potência devido à 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, 2010). Nesse estudo os resultados encontrados para transitórios operacionais de borção e deborção se mostraram confiáveis, representando o comportamento esperado para as grandezas analisadas. 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.

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 extensa; (ii) o amplo número de trabalhos defendendo argumentos credíveis para apoiar o potencial de competitividade econômica dos SMRs (PETROVIC et al., 2012). Além disso, as atividades técnicas e programáticas internacionais sobre SMRs, coordenados pela IAEA, incentivaram o interesse mundial. Várias iniciativas relacionadas com o SMR recentes na Europa e Ásia, mesmo em países onde reatores de grande porte são historicamente preferidos, firmou um forte apoio ao SMRs nos últimos anos (PETROVIC et al., 2012).

2.3 Eventos de diluição de Boro

Para o ajuste da reatividade, em reatores de água pressurizada (PWRs), um absorvedor de nêutrons solúvel é dissolvido no refrigerante. A variação da concentração do absorvedor de nêutrons com o tempo pode compensar o excesso de reatividade positiva (LEWIS, 2008). O Ácido Bórico (H_3BO_3) é utilizado como um absorvente de nêutrons solúvel e usado para ajustar a criticalidade do reator. A queda imprevisível da concentração de Boro no refrigerante primário caracteriza um evento de diluição de Boro (IAEA, 2003).

Através do sistema de controle químico e de volume (CVCS - *Chemical and Volume Control System*) a diluição de Boro no circuito pode ser homogênea ou não homogênea. Quando homogênea, a operação das bombas do circuito primário ou circulação natural do líquido de refrigeração é suficiente para que a mistura seja uniforme em todo o circuito primário. Esse processo é lento e o operador normalmente tem tempo suficiente para fazer os ajustes necessários. A diluição homogênea é geralmente classificada como uma Ocorrência Operacional Antecipada (AOO - *Anticipated Operational Occurrences*).

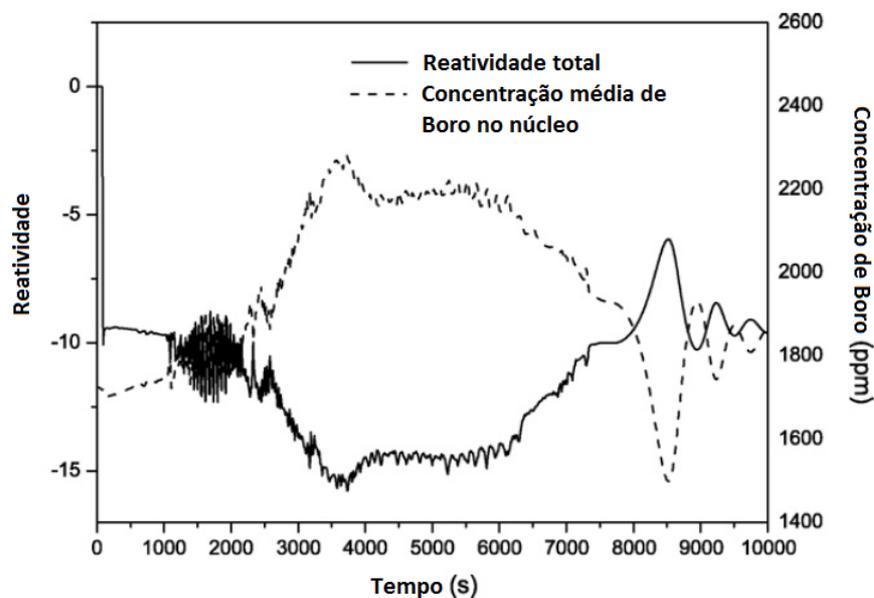
Quando a diluição de Boro é local, ou não homogênea, uma quantidade de água não borada ou de água com baixa concentração de Boro é acumulada no circuito primário. Deste modo, há potencial para um aumento rápido de potência no núcleo se essa amostra for transportada para o núcleo do reator. Essas concentrações podem ser formadas pela injeção de

água não borada através do CVCS. Esses eventos são chamados de casos de diluição externa e eles são classificados como acidentes (IAEA, 2003).

Estudos sobre transientes de diluição de Boro foram iniciados desde a década de 60 com a análise de eventos devido ao mau funcionamento ou às falhas no sistema de controle químico e de volume (CVCS). No entanto, poucas sequências em diluição de Boro foram estudadas entre os anos 1970 e os anos 1980. No início de 1990, o interesse internacional em transientes de diluição de Boro surgiu coincidindo com o lançamento de vários projetos em diferentes domínios da segurança nuclear (FREIXA et al., 2009).

Em um estudo realizado por Freixa et al. (2009) sobre transientes de reatividade por perda de refrigerante proveniente de pequenas rupturas (SBLOCA - *Small Break Loss-of-Coolant-Accident*), é apresentado o comportamento da reatividade e da concentração média de Boro no núcleo do reator em função do tempo. Esse comportamento é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Reatividade e concentração média de Boro no núcleo em função do tempo.



Fonte: adaptado de FREIXA et al., 2009.

Na Figura 7, é possível verificar que quanto maior a concentração de Boro, maior será a absorção de nêutrons, e, conseqüentemente, menor será a reatividade. Na figura supracitada, é possível verificar que a concentração média de Boro varia de 1500 ppm até 2300 ppm. 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).

Na Usina Nuclear Angra 1 (reator do tipo PWR, licenciado para operar com 640 MW elétricos), o Sistema de Injeção de Segurança (SIS) está alocado no edifício de segurança. Nesse

edifício estão instalados a maioria dos componentes dos sistemas destinados à garantir a segurança da usina (SANTOS, 1999). O SIS tem como função proporcionar o resfriamento de emergência do núcleo, nos casos de acidentes com perda de refrigerante, e injetar água com altas concentrações de Boro na ocorrência de acidentes com despressurização acentuada do secundário dos geradores de vapor e resfriamento excessivo do primário (SANTOS, 1999).

O SIS contém um Tanque de Injeção de Boro (TIB) cuja concentração de Boro usada era de 20000 ppm. Em um estudo realizado por Santos (1999) para o reator de Angra 1 foi concluído que a concentração de 20000 ppm usada, poderia ser reduzida para o valor de 2000 ppm. Um benefício imediato obtidos na segurança operacional, decorrente essa mudança, foi a redução de custos destinados à manutenção e à inspeção desse sistema (SANTOS, 1999).

Nos últimos, transientes de reatividade em função dos eventos de diluição de Boro tornaram-se importante como questão de segurança (GONZÁLEZ; QUERAL; EXPÓSITO, 2007). Várias pesquisas tem sido realizadas para fornecer conhecimentos necessários para prever esses acidentes. As sequências de diluição heterogênea, podem ser de dois tipos: (i) extrínseca, quando um sistema injeta lentamente água com baixa concentração de Boro no sistema que se acumula em algum lugar do sistema de refrigeração do reator sem se misturar com a água borada; (ii) intrínseca, quando o mecanismo de arrefecimento de refluxo acontece. Se a pressão for suficientemente elevada, o vapor pode comprimir o ar/N₂ do lado inferior do tubo em U e gerar condensação. Como resultado, a água com baixa concentração de Boro pode ser acumulada através da perna.

No que diz respeito à simulação de transientes de diluição de Boro, existem várias melhorias que podem ser consideradas: (i) inserir uma malha adequada a fim de observar a região de baixa concentração de Boro e minimizar a difusão numérica; (ii) incluir limitadores de fluxo, que introduz uma maior redução da difusão numérica, a fim de obter um bom transporte convectivo Boro.

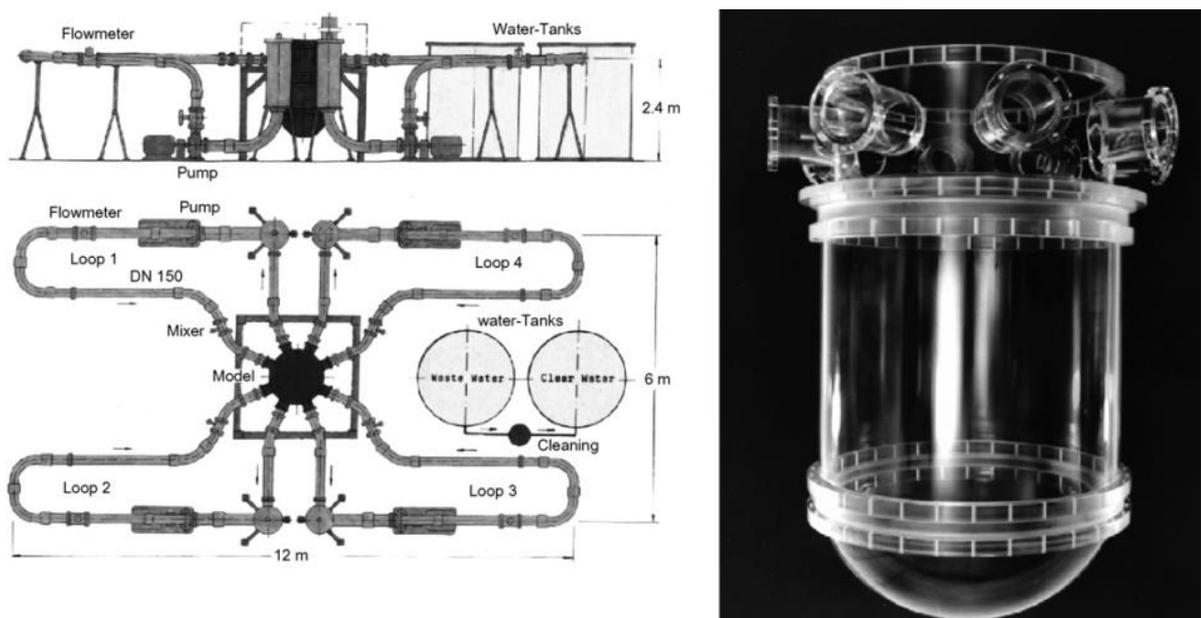
2.4 Determinação da concentração de Boro na literatura

O estudo da mistura de Ácido Bórico em um reator é realizado por simulações executadas por códigos computacionais, ou ainda, pelo uso de algumas seções de teste que consideram geometrias específicas para vários tipos de reatores. Dentre as instalações construídas para esse estudo, há seções concebidas para representar a inicialização do sistema,

isto é, dispõem de apenas uma bomba em um dos loops, os demais loops são apenas passivos (KLIEM et al., 2008). Outras seções foram designadas para investigar a mistura de água injetada na perna fria em resfriamento no núcleo de um PWR em situações de emergência. Há ainda a seção de teste ROCOM (*Rosendorf Coolant Mixing Model*) que foi usada para ambos os tipos de cenários mencionados. Essa seção apresenta alta flexibilidade para a realização de experimentos, visto que, permite a seleção das condições de contorno (KLIEM et al., 2008).

A seção ROCOM dispõe de quatro loops com um vaso de pressão do reator feito em polimetilmetacrilato (PMMA) para a investigação da mistura do refrigerante a temperatura ambiente, conforme representado na Figura 8. O modelo dessa seção corresponde a uma escala linear de 1:5, de um reator do tipo KONVOI com detalhes importantes da mistura do refrigerante ao longo do percurso do fluxo (KLIEM et al., 2008). Para a concepção do ROCOM, foi inserida uma placa de suporte posicionada na parte inferior do vaso simulando a geometria das entradas no núcleo do reator, de modo a analisar os componentes que afetam significativamente o campo de velocidade. Já o núcleo e o pleno superior foram modelados de modo mais simplificado. Além disso, as bombas foram posicionadas e configuradas de modo a proporcionar condições individuais em cada loop, permitindo realizar testes em uma ampla gama de condições de fluxo. O volume de água nos loops foi mantido a uma escala de 1:125, e o tempo de viagem do refrigerante permaneceu idêntico ao do reator original (KLIEM et al., 2008).

Figura 8 – Seção de teste ROCOM.



(a) Esquema da seção de teste ROCOM. (b) Vaso da seção de teste ROCOM.

Fonte: KLIEM et. al. (2008).

A seção de teste ROCOM opera com água desmineralizada. Dois loops são equipados com um par de válvulas do tipo gaveta (*gate valves*) de ação rápida. A água entre as válvulas, em um ou dois loops (dependendo do cenário em estudo), contém sal como elemento traço para estabilizar a condutividade a um nível de $100 \mu\text{S}/\text{cm}$, caracterizando o máximo de não boração (*under-boration*) (KLIEM et al., 2008).

A instalação ROCOM é equipada com dispositivos de medida de alta resolução para detectar a concentração espacial e do tempo do elemento traço. A concentração é determinada pela medida da condutividade elétrica, que é determinada através de sensores eletrodos dispostos em duas grades ortogonais colocado na seção transversal do vaso da seção de teste. Os valores da condutividade medidos são transformados em um escalar adimensional, que é calculado com base na condutividade local instantânea com a amplitude da variação da condutividade que circula na perna fria (KLIEM et al., 2008).

Em um teste de ensaio estacionário, todos os quatro loops são colocados em operação, enquanto a solução traço é injetada em um deles. No teste de ensaio transiente, a inicialização da primeira bomba de refrigerante principal foi simulada, e em outro ensaio água com densidade elevada foi injetada dentro do circuito primário da seção de teste. A injeção do traçador é realizado por meio de um computador que controla válvulas magnéticas e pneumáticas. Geralmente para a injeção do traçador em um estado estacionário, depois de iniciar as medições as válvulas são abertas por 5 s, injetando água com sal dentro do fluxo do loop 1.

Em um ensaio transiente, uma solução para deboração é preparada e alocada entre duas válvulas que existem no loop 1. Na condição inicial, o refrigerante está estagnado em toda a instalação do ensaio. No instante $t = -3 \text{ s}$, o experimento é iniciado com a abertura das válvulas. Em $t = 0 \text{ s}$, a bomba no loop 1 é inicializada com a rotação controlada como uma rampa linear. A duração da rampa é a mesma de um reator: 14 s. A taxa de fluxo no final da rampa corresponde à taxa de fluxo nominal durante um ciclo ($185,0 \text{ m}^3/\text{h}$ - correspondendo a uma velocidade de $2,1 \text{ m}/\text{s}$) (KLIEM et al., 2008).

A seção de teste ROCOM também é utilizada para investigar a influência dos efeitos da diferença de densidade (água para o resfriamento do núcleo em situações de emergência), que podem ser negligenciados quando as taxas de fluxo são consideravelmente elevadas. Para simular a mistura de água fria de resfriamento do núcleo, um bico de injeção, modelado com precisão, foi ligado a uma das pernas frias do ROCOM. A diferença de densidade foi simulada por adição de açúcar (glucose) na água que foi injetada na perna fria. Como a água que já tinha uma quantidade de cloreto de sódio (conforme descrito para os outros ensaios), a diferença de

densidade foi determinada por dois sensores radiais instalados na seção de teste (KLIEM et al., 2008).

2.5 Técnica para a medida da concentração

Técnicas experimentais são utilizadas como ferramenta de engenharia para medir o desempenho de um fluido em movimento, ou como instrumento científico para avaliar o comportamento físico dos processos de transporte (MEINHART; WERELEY; SANTIAGO, 1999). A precisão dessas técnicas é essencial para validar códigos que descrevem o comportamento dos fluidos. Essa validação permite antever o comportamento do fluido em estruturas complexas e sua influência sobre o transporte e dispersão de partículas (CULLIVAN; WILLIAMS, 2005).

No caso de uma mistura de fluidos dinâmicos é necessário escolher uma técnica que disponha de sensores capazes de mensurar o fluxo e a concentração de cada componente. Dentre as técnicas utilizadas para este fim, neste tópico será apresentada uma breve revisão referente à técnica da medida da condutividade elétrica.

2.5.1. Condutividade elétrica

A condutividade em um meio fluido é uma medida da capacidade de uma solução aquosa de transportar uma corrente elétrica. Esta capacidade depende da presença de íons, da mobilidade e valência, e da temperatura. A condutividade elétrica da água está diretamente relacionada com a concentração de solutos dissolvidos na água. Os íons do soluto dissolvidos na água podem induzir a condução de uma corrente elétrica na água, que pode ser medida utilizando um medidor de condutividade.

Existem dois tipos de medição de condutividade: o contato e indutivo. A escolha de qual tipo utilizar depende da quantidade de condutividade, a corrosividade do líquido, e a quantidade de sólidos em suspensão (ROSEMOUT ANALYTICAL, 2010). As medidas de condutividade de contato são restritas a aplicações em que: (i) a condutividade é muito baixa; (ii) a amostra não é corrosiva; e (iii) a amostra não apresenta partículas sólidas em suspensão.

Segundo Rosemount Analytical (2010), para aferir a concentração de uma solução através da medida da condutividade, vários requisitos devem ser atendidos:

1. O líquido deve conter um eletrólito único ou o eletrólito de interesse deve ser o principal contribuinte para a condutividade;
2. Deve haver uma alteração mensurável na condutividade ao longo do intervalo de concentrações, e a condutividade deve ser crescente ou decrescente ao longo do intervalo;
3. Devem existir dados suficientes para permitir uma monitoração da mudança de condutividade em função da temperatura. Se os dados não estiverem disponíveis em livros de referência, devem de ser determinados experimentalmente.

Para determinar a distribuição de concentração de Boro no circuito primário de um PWR uma malha de sensores baseados em medição de condutividade elétrica foi usada para medir em detalhes a propagação de um traçador na instalação. A distribuição resultante da concentração de Boro na entrada central foi medida com um sensor integrado na placa inferior do núcleo de suporte proporcionando uma posição de medição no momento da entrada em cada conjunto de combustível (KLIEM, et al., 2008). Nesse estudo, para simular a água borada é utilizada água salgada para alterar a condutividade elétrica.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados detalhes da instalação experimental montada no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN/NE) que, neste trabalho, foi utilizada para verificar a viabilidade de representar cenários para estudar a dispersão do Boro em um pressurizador de um reator modular compacto e integral. Após a descrição da montagem experimental serão apresentados os ajustes realizados na montagem que permitiram a execução de experimentos preliminares. Logo depois, serão relatados os parâmetros estabelecidos para realização dos experimentos a fim de caracterizar um cenário de boração e deboração.

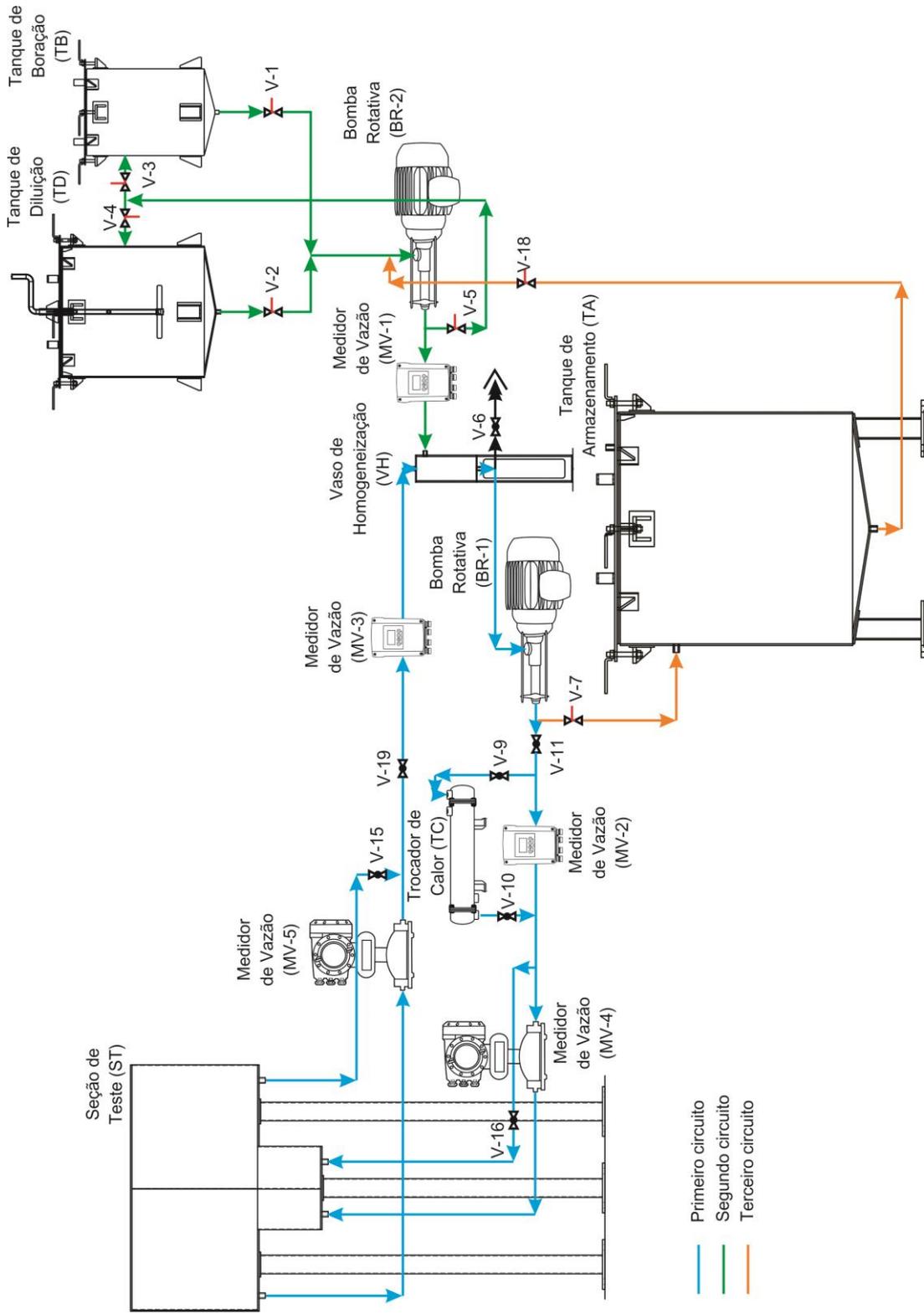
3.1 Descrição geral da montagem experimental

Para o estudo da diluição de Boro no pressurizador de um reator modular integral compacto o projeto de uma montagem experimental em escala reduzida, mantendo as condições de similaridade, foi consolidado no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN/NE), cuja configuração geral é representada esquematicamente na Figura 9.

A montagem experimental é formada basicamente por 3 circuitos. 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 irá representar 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, o objetivo é 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 será 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, a montagem experimental dispõe de um segundo circuito que é 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, pretende-se alimentar o primeiro circuito 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 9 – Esquema da montagem experimental implantada no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN/NE).



Fonte: Própria autoria.

A seção de teste, apresentada na Figura 10, 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 96 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 10 – Seção de testes (ST) em aço inox.

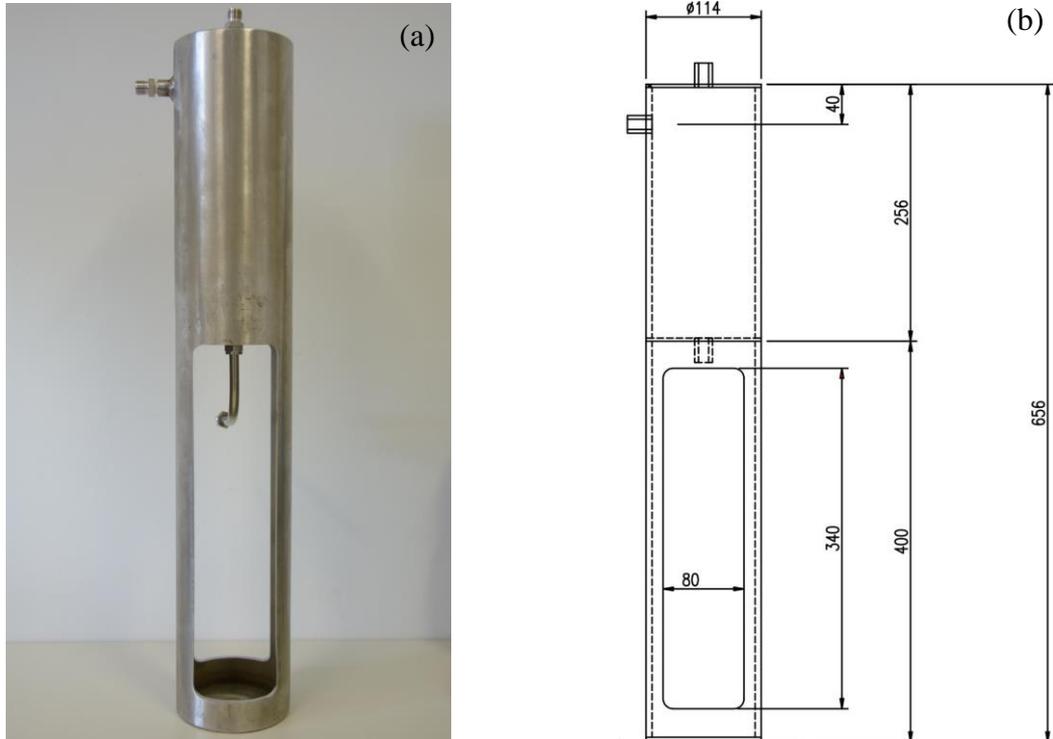


Fonte: Própria autoria.

O vaso de homogeneização (VH) foi confeccionado em aço inoxidável com capacidade de aproximadamente 2 litros. Esse vaso foi constituído para funcionar como: um misturador mecânico, auxiliando no processo de homogeneização, e um vaso extrator permitindo fazer uma coleta de amostras para análise laboratorial. O VH também pode ser usado para extrair uma amostra do fluido proveniente do tanque de boração e da saída da seção de teste, proporcionando um balanço na vazão do circuito. A imagem do vaso de homogeneização e um

esquema referente a sua configuração (com dimensões apresentadas em milímetros) são apresentados na Figura 11.

Figura 11 – Vaso de homogeneização (VH).



Fontes: (a) Própria autoria; (b) Bezerra, 2012.

A bomba de sucção (BR-1) é uma bomba rotativa de deslocamento positivo do tipo NEMO NETZSCH, modelo NM 008 BY 03 S 12 B, número de série B81428. Na Figura 12 é possível visualizar a bomba BR-1 utilizada na instalação experimental.

Figura 12 – Bomba rotativa de sucção (BR-1).



Fonte: Própria autoria.

A bomba BR-1 apresenta as seguintes características: motor elétrico de 0,55 kW; 8 pólos; 60 Hz; 220/380/440/760V; trifásica; rotor em aço inoxidável 316 C /cromado duro especial (UM 80 °C); estator borracha SBE; guarnição da carcaça VITON. As condições de trabalho previstas são: bombear água e NaCl (a uma temperatura entre 55 e 84 °C); vazão de projeto entre 0,08 e 0,50 litros por minuto; pressão manométrica 1,4 bar; rotação entre 96 e 562 rpm; potência absorvida 0,69 kW; e tensão de alimentação de 220 V (trifásica). O acionamento e controle de operação da bomba NEMO é feito através do inversor de frequência WEG série CFW-08 0040 B 2024 PSZ, apresentado na Figura 13.

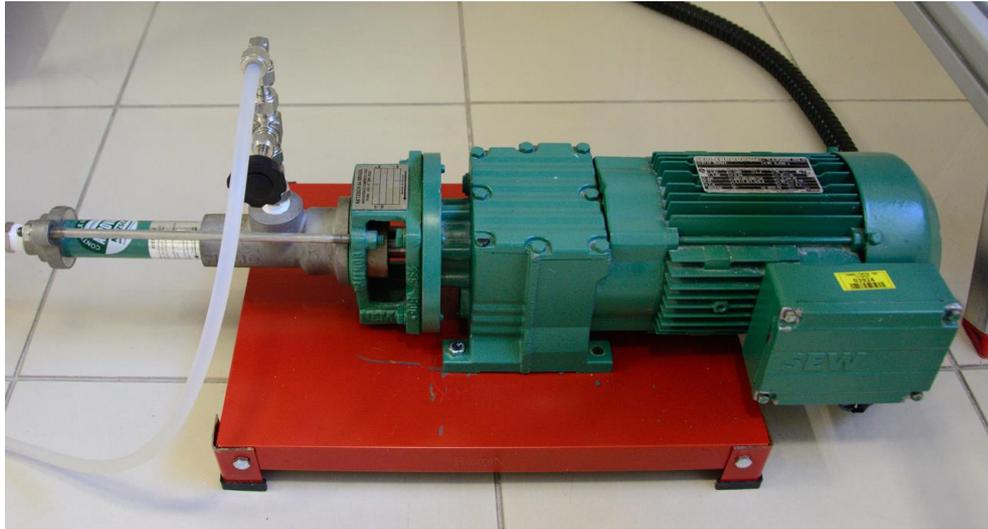
Figura 13 – Inversor de frequência WEG.



Fonte: Própria autoria.

A bomba (BR-2), Figura 14, também é uma bomba rotativa de deslocamento positivo do tipo NEMO NETZSCH, modelo NM 011 BY 02 S 12 B, número B65884. Dentre suas especificações, podem ser citadas: motor elétrico de 0,55 kW; 4 pólos; 4 tensões, 60 Hz; trifásica; rotor em aço inox 316 C /polimento extra (UM 80 °C); estator borracha SBE; guarnição da carcaça anéis “O” VITON. As condições de trabalho previstas são: bombear água e sal (a uma temperatura entre 55 e 84 °C); vazão de projeto entre 0,3 e 1,5 litros por minuto; pressão manométrica 1,4 bar; rotação entre 96 e 562 rpm; potência absorvida 0,69 kW; e tensão de alimentação de 220 V (trifásica - durante a sua instalação elétrica foi adaptada para trabalhar em duas fases). O acionamento e controle de operação da bomba BR-2 é feito através do inversor de frequência WEG série CFW-08 0040 B 2024 PSZ.

Figura 14 – Bomba rotativa de sucção (BR-2).



Fonte: Própria autoria.

Para determinar a vazão no circuito, foram instalados dois tipos de medidores: eletromagnético e mássico. Os medidores do tipo eletromagnético (MV-1, MV-2 e MV-3) são sensores da marca KROHNE modelo OPTIFLUX KC1000C/6 com diâmetro de 2,5 milímetros, revestimento de teflon, eletrodo HC4, padrão do flange ASME 150#RF e proteção IP67. Os três medidores foram calibrados para operar com uma vazão da ordem de 20 litros por hora. Os números de série dos medidores MV-1, MV-2 e MV-3 são, respectivamente, C12500773, C12500771 e C12500772. O modelo da unidade eletrônica (conversor) é o IFC 100C, com alimentação de 110/220 VAC 50/60Hz e sinal de saída de 4 a 20 mA. Na Figura 15 é possível visualizar um medidor de vazão do tipo eletromagnético.

Figura 15 – Medidor de vazão do tipo eletromagnético.



Fonte: Própria autoria.

Os medidores do tipo mássicos (MV-4 e MV-5) são sensores da marca KROHNE modelo OPTIMASS 3000 H03 com números de série, respectivamente, G130000000313012 e G130000000313011. Os medidores mássicos também foram calibrados para operar com uma vazão da ordem de 20 litros por hora. O número de série referente a calibração desses medidores é 1121253969. Na Figura 16 é possível visualizar o medidor do tipo mássico.

Figura 16 – Medidor de vazão do tipo mássico.

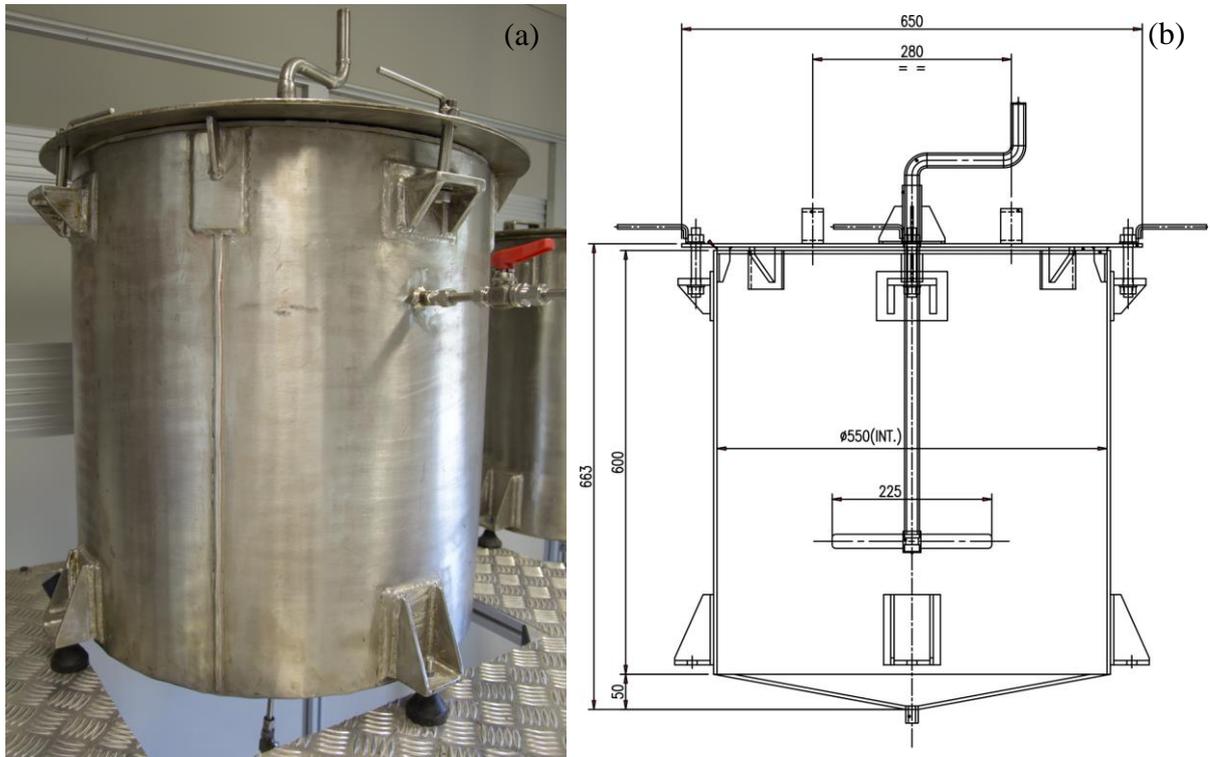


Fonte: Própria autoria.

No circuito acoplado ao circuito primário há dois tanques: o de diluição (TD) e o de boração (TB). Esses tanques foram confeccionados em aço inoxidável e estão alocados sobre uma plataforma metálica com, aproximadamente, 1,50 metros de altura. O tanque de diluição é o reservatório destinado para diluir uma amostra com uma concentração conhecida que será inserida no primeiro circuito (que dá acesso a seção de teste). O TD, apresentado na Figura 17, apresenta uma capacidade de, aproximadamente, 142,55 litros. O tanque de boração (TB) foi confeccionado para funcionar como reservatório que terá uma solução com a concentração máxima. O TB, apresentado na Figura 18, apresenta uma capacidade de, aproximadamente, 69,2 litros.

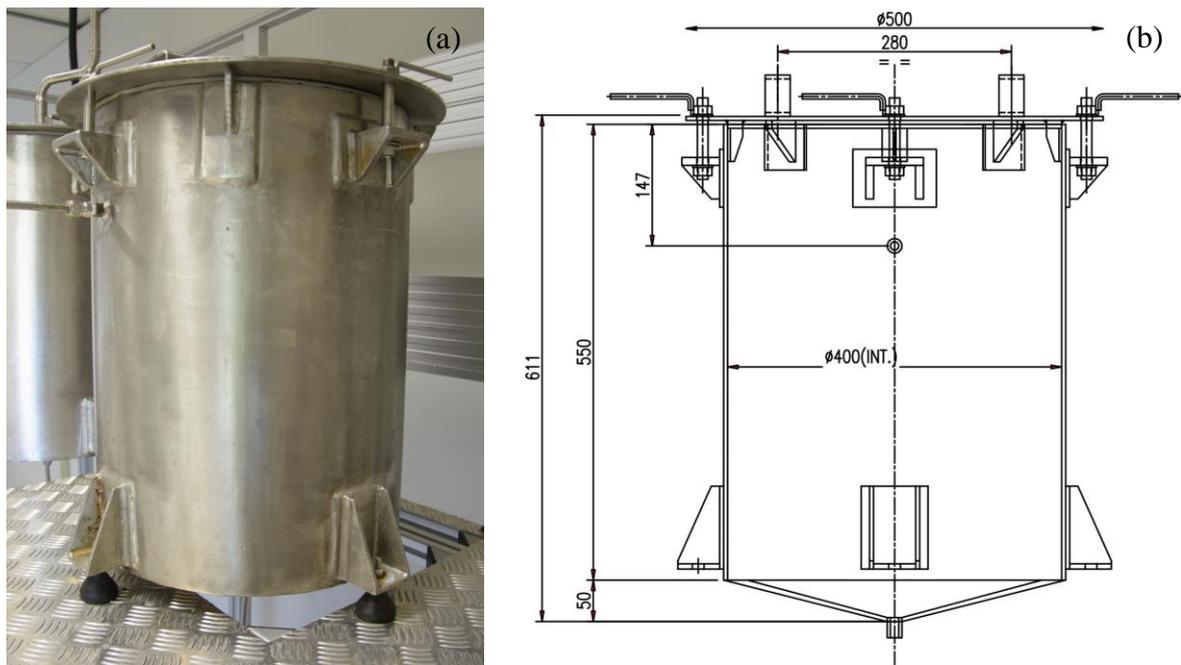
No terceiro circuito há um tanque de armazenamento (TA), também confeccionado em aço inoxidável, com capacidade de aproximadamente, 215,69 litros. A seção de teste e os tanques de diluição, boração e armazenamento foram instalados sobre amortecedores sólidos de um estágio, proporcionando maior estabilidade ao circuito. Ao lado das imagens dos tanques estão os esquemas referente com a configuração dos mesmos com dimensões apresentadas em milímetros.

Figura 17 – Tanque de diluição (TD).



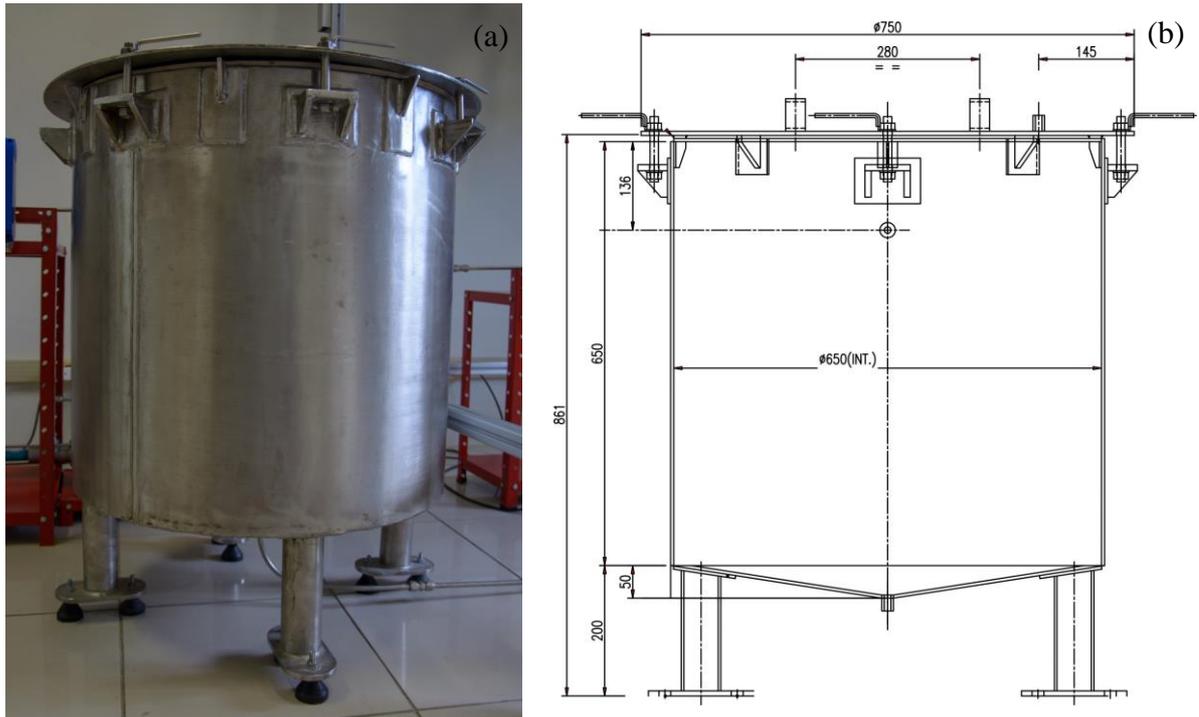
Fontes: (a) Própria autoria; (b) Bezerra, 2012.

Figura 18 – Tanque de boração (TB).



Fontes: (a) Própria autoria; (b) Bezerra, 2012.

Figura 19 – Tanque de armazenamento (TA).



Fontes: (a) Própria autoria; (b) Bezerra, 2012.

Cerca de 95 % da tubulação utilizada na instalação experimental corresponde a tubos de aço inoxidável, ponta lisa, com diâmetro nominal de 3/8". Os tubos em aço são da marca SANDVIK 3R60, que segue o padrão ASTM TP316L, TP316. Uma amostra desse tipo de tubulação é apresentada na Figura 20. A tubulação em aço inoxidável é empregada quando a aplicação requer resistência à altas e baixas temperaturas ou a corrosão, quando há necessidade de não contaminação e/ou exige maior índice de segurança. Para os outros 5 % restantes, foram instalados, em pontos estratégicos do circuito, tubulações de polietileno natural com o mesmo diâmetro. A tubulação de polietileno foi instalada antes das entradas de acesso às bombas dosadoras BC-1 e BC-2. Por ser transparente, o uso da tubulação de polietileno permite verificar se possuía entrada de ar na área de sucção das bombas.

Todas conexões (joelhos, têes e conectores) utilizados para a montagem experimental são da marca HOKE GYROLOK. As conexões, apresentadas na Figura 21, são confeccionadas em aço inoxidável 316, adaptados para alojar a tubulação em aço. As válvulas alocadas ao longo do circuito também são da marca HOKE GYROLOK. Há dois tipos de válvulas, as válvulas V-6, 9, 10, 11, 15, 16, 19 são do tipo agulha (Figura 22) e as válvulas V-1, 2, 3, 4, 5, 7 e 18 são do tipo esfera (Figura 23).

A disposição geral dos itens que compõem a montagem experimental está apresentada na Figura 24.

Figura 20 – Amostra da tubulação em aço inoxidável utilizada na instalação experimental.



Figura 21 – Conexões em aço inoxidável da HOKE GYROLOK.



Figura 22 – Válvula agulha da HOKE GYROLOK.



Figura 23 – Válvula esfera da HOKE GYROLOK.



Figura 24 – Montagem experimental implantada no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN/NE).



Fonte: Própria autoria.

3.2 Operação teste da montagem experimental

A operação teste consiste em preencher a montagem experimental (seus tanques e tubulações) com água filtrada, remover o ar das tubulações e observar o comportamento do circuito em operação. Os objetivos ao executar a operação teste foram: (i) verificar a estabilidade da vazão volumétrica na entrada e na saída da seção de teste; e (ii) observar o comportamento da montagem experimental após acionar a bomba rotativa BR-2. A bomba BR-2 alimenta o primeiro circuito com água proveniente do tanque de boração (TB) e/ou do tanque de diluição (TD).

Para a realização da operação teste, inicialmente, todos os reservatórios que compõem a montagem experimental (tanques de diluição (TD), boração (TB), armazenamento (TA) e a seção de teste (ST)) foram preenchidos com água filtrada. A quantidade de água para cada reservatório correspondia a um terço de sua capacidade, por exemplo, na seção de teste, cuja capacidade máxima é de 96 litros, para a operação teste foi utilizada uma a quantidade correspondente a 32 litros de água. As tubulações também foram preenchidas por água filtrada. Para garantir que as tubulações fossem desaeradas, inicialmente as válvulas eram abertas, fazia-se passar um fluxo contínuo de água filtrada e, em seguida, as válvulas eram fechadas. Durante esse processo, o vaso de homogeneização (VH) foi totalmente preenchido por água filtrada.

Para o início da operação teste, as válvulas V-1, V-2, V-5, V-6, V-7 e V-18 foram fechadas. Como a realização da operação teste foi executada à temperatura ambiente, as válvulas que dão acesso ao trocador de calor (V-9 e V-10) também permaneceram fechadas.

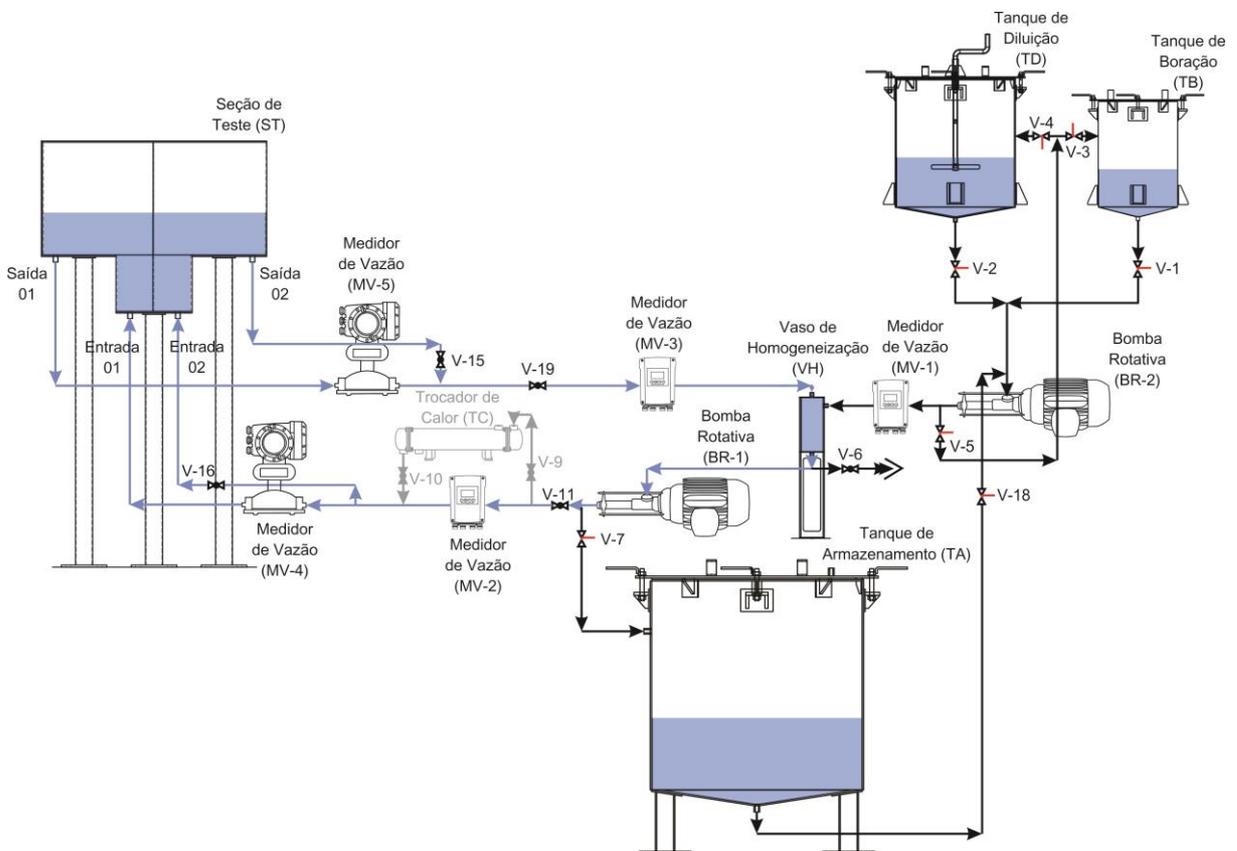
A bomba BR-1 foi acionada fazendo a água filtrada passar pela válvula V-11, pelo medidor de vazão MV-2 e alimentar a seção de teste, pelas entradas 01 e 02. Nas saídas 01 e 02 da seção de teste, a água passava pela válvula V-19, medidor de vazão MV-3, pelo vaso de homogeneização (VH) e retornava a bomba BR-1. Um esquema da montagem experimental durante a operação teste é apresentado na Figura 25.

Durante a operação teste, a estabilidade da vazão volumétrica na entrada e saída da seção de teste foi avaliada comparando os valores apresentados nos medidores de vazão MV-2 e MV-3. O valor médio mais ou menos o desvio padrão experimental apresentado pelos medidores MV-2 e MV-3 foram, respectivamente, $14,3 \pm 0,3$ e $14,4 \pm 0,2$ litros por hora. Ao comparar esses valores, a vazão volumétrica pode ser considerada constante. Entretanto, essa pequena flutuação influenciava consideravelmente na estabilidade da vazão no decorrer do tempo. Como a capacidade do vaso de homogeneização é de aproximadamente 2 litros, para

operações com duração maior que 30 minutos, foi possível identificar que a bomba BR-1 começava a operar com ar acarretando uma diminuição da vazão volumétrica (observada no medidor MV-2). Como não é recomendado a operação da bomba com ar, a operação teste era parcialmente suspensa, até que as tubulações fossem desaeradas, garantindo que a bomba estivesse alimentada por água filtrada.

Outro fator importante observado durante a operação teste, foi que os medidores de vazão mássicos MV-4 e MV-5 apresentam uma resistência no fluxo de água. Assim, o ajuste para manter a vazão volumétrica igual nas duas entradas (e conseqüentemente, nas duas saídas) é muito complexo para ser realizado apenas pelas válvulas agulha instaladas no circuito.

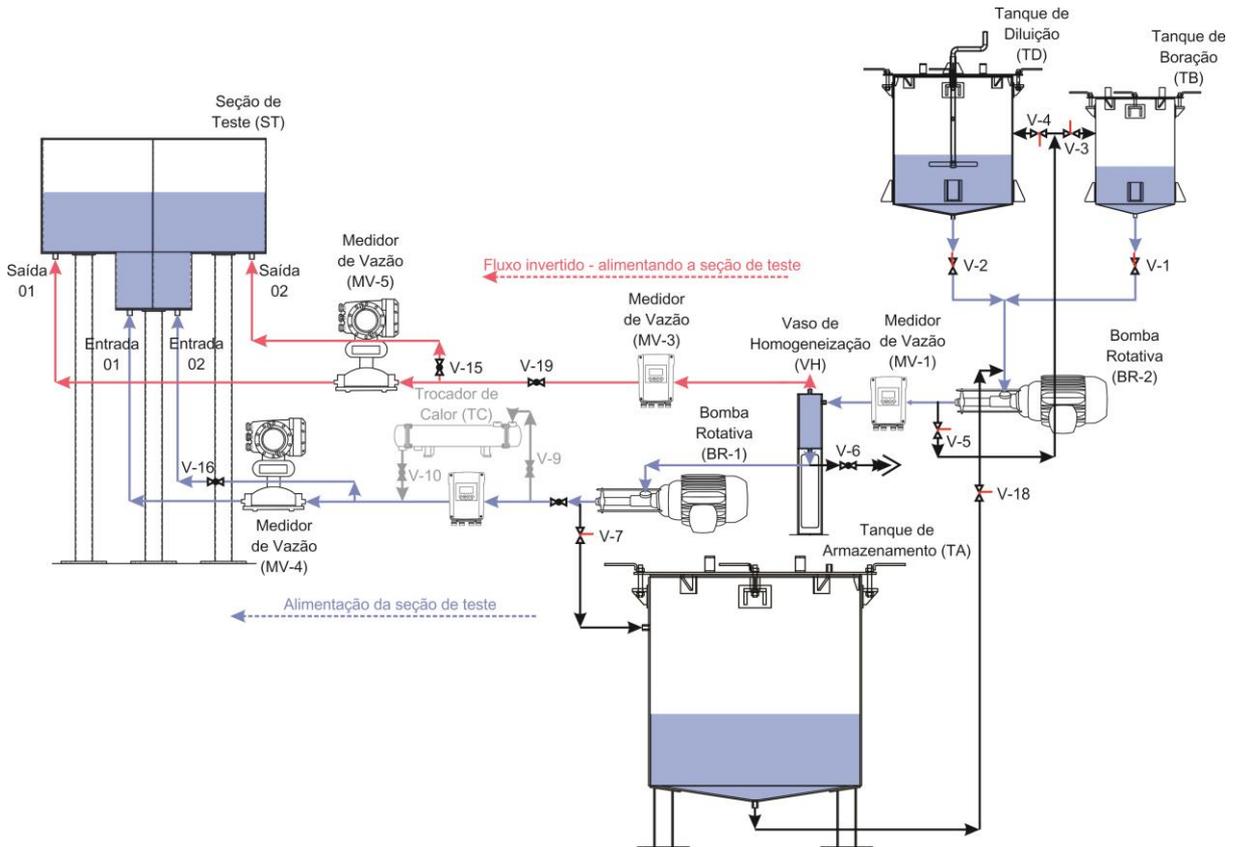
Figura 25 – Esquema da montagem experimental durante a primeira etapa da operação teste.



A segunda etapa da operação teste, corresponde ao acionamento da bomba rotativa BR-2 de modo a alimentar o primeiro circuito que dá acesso a seção de teste. Para isso, as válvulas V-1 e V-2 foram abertas e a bomba BR-2 foi acionada. Através do medidor de vazão MV-1, foi possível verificar que a água proveniente dos tanques de boração (TB) e de diluição (TD) alimentava o primeiro circuito. Entretanto a alimentação da seção de teste não estava sendo realizada apenas pelas entradas 01 e 02, mas também pelas saídas 01 e 02. Com o acionamento

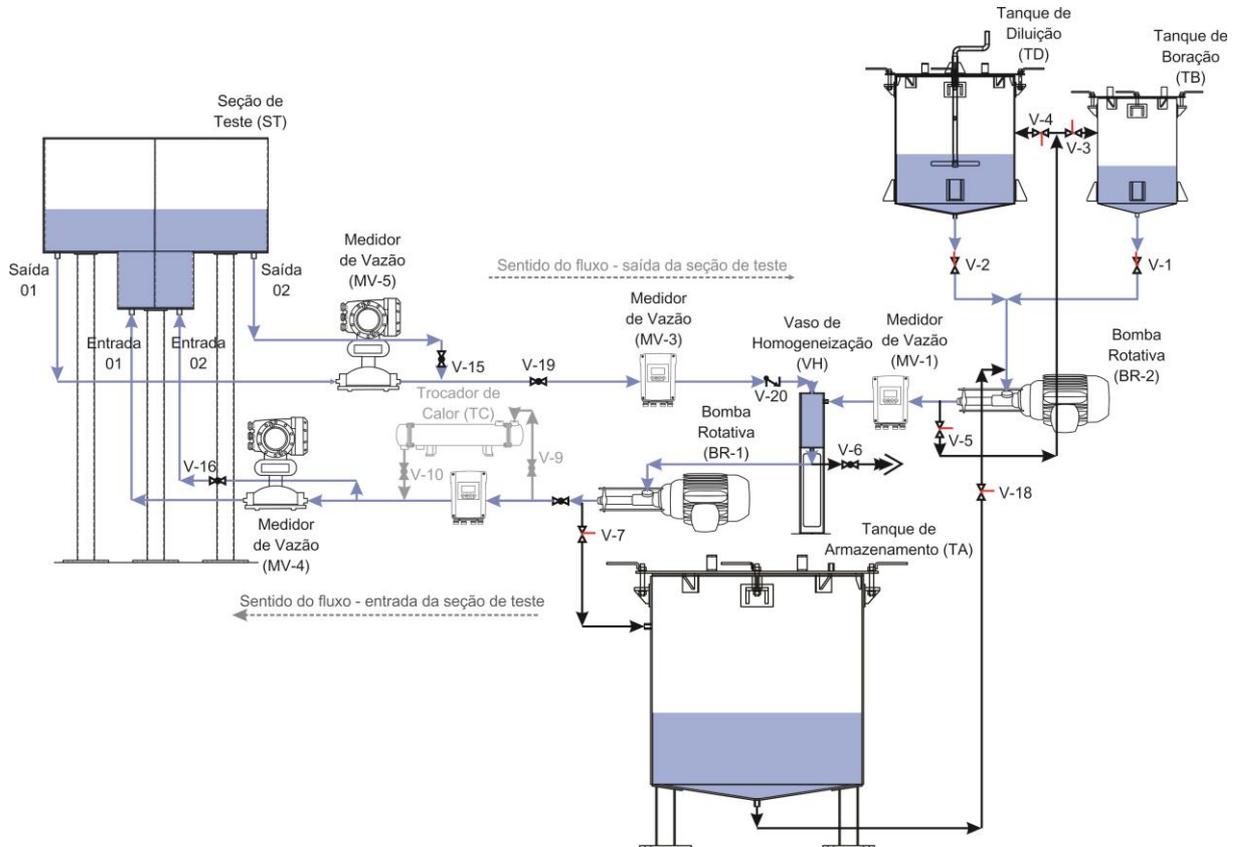
da bomba BR-2 o sentido do fluxo de saída foi invertido. A água entrava no vaso homogeneizador (VH), passava pelo medidor de vazão MV-3, válvula V-19 e entrava na seção também pelas saída 01 e 02. Um esquema representando a direção e sentido do fluxo da água durante a segunda etapa da operação teste é apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Esquema da montagem experimental durante a segunda etapa da operação teste.



Para impedir que a água entrasse na seção de teste através das saídas 01 e 02, foi inserida uma válvula de retenção (*check*) do tipo pistão, com corpo e interno em aço inox 316, vedações em viton/teflon, com pressão de abertura correspondente a 2 PSI, dupla anilha e com diâmetro de 3/8" OD. A válvula de retenção controla o sentido do fluxo, permitindo que o fluxo seja em apenas um sentido. Essa válvula foi inserida entre o medidor de vazão MV-3 e o vaso de homogeneização. Um esquema representando a inserção da válvula de retenção (V-20) é apresentado na Figura 27. Após a inserção da válvula de retenção (V-20), o circuito voltou a operar com a seção de teste sendo alimentada apenas pelas entradas 01 e 02, como desejado. Nas saídas 01 e 02 o fluxo retornava ao vaso homogeneizador, mas a vazão não era suficiente para manter o equilíbrio que garantisse a estabilidade entre a entrada e a saída da seção de teste.

Figura 27 – Esquema da montagem experimental durante operação teste com a inserção da válvula de retenção (V-20).



A execução da operação teste permitiu verificar que:

- a vazão volumétrica na entrada e na saída da seção de teste pode ser considerada estável, entretanto, essa estabilidade não se mantém para intervalos de tempo maiores que 30 minutos;
- o acionamento da bomba BR-2, provocou uma inversão no sentido do fluxo de saída da seção de teste. Para corrigir esse comportamento foi inserida uma válvula de retenção que controlou o fluxo de modo que a água filtrada entrava na seção pelas entradas 01 e 02 e saía pelas saídas 01 e 02. Em contrapartida, a inserção da válvula provocou instabilidade no equilíbrio da vazão volumétrica na entrada e na saída da seção de teste.

Como a proposta em estudo está focada no comportamento da diluição dentro do pressurizador, ou seja, a mistura dentro da seção de teste, optou-se por modificar a estrutura do circuito. A mudança estrutural da montagem experimental foi realizada visando obter uma vazão na entrada e saída da seção de teste constante e que ao inserir um volume de água proveniente do tanque de boração ou de diluição o fluxo de entrada e saída da seção de teste

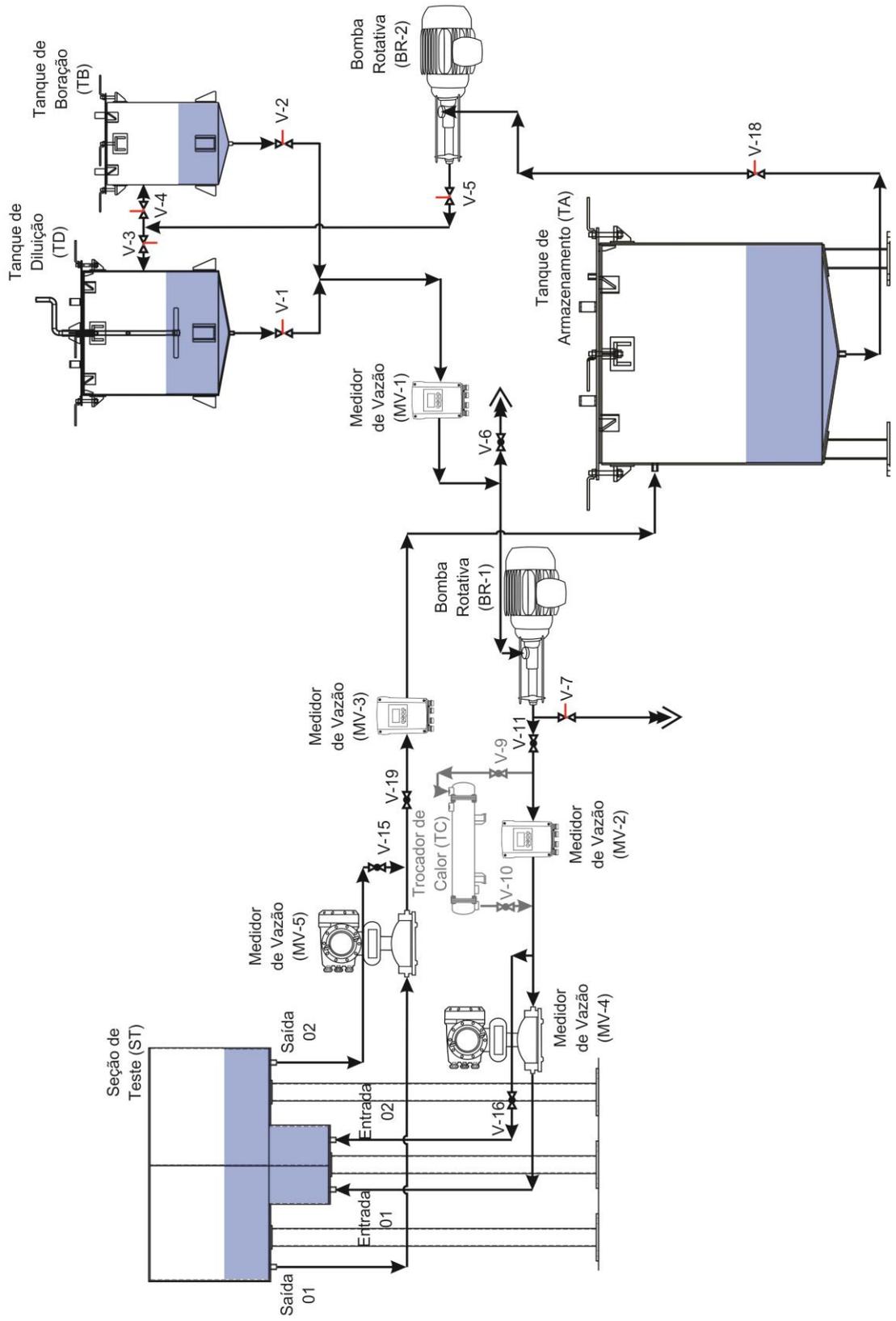
permanecesse estável. Para isso, o vaso de homogeneização foi temporariamente removido do circuito. Assim a água proveniente do tanque de boração (TB) e/ou do tanque de diluição (TD) passa pelo medidor de vazão MV-1 e vai para a bomba BR-1. Entre o medidor MV-1 e a bomba BR-1 foi alocada uma tubulação 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 disposição dos itens da montagem experimental após as modificações baseadas na operação teste é representada esquematicamente na Figura 28.

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 concentração 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.

A montagem experimental com a configuração apresentada na Figura 28 proporciona estabilidade na vazão na entrada e saída da seção de teste e permite simular um cenário que representa uma boração (ou deboração), assim, essa configuração será utilizada para a realização dos experimentos no decorrer desse estudo.

Figura 28 – Esquema da instalação experimental após a operação teste.



3.3 Procedimentos experimentais

3.3.1 Vazão volumétrica em função da frequência de rotação da bomba BR-1

A vazão volumétrica de água que alimenta a seção de teste é controlada através da bomba rotativa BR-1. Quando necessário, um ajuste fino da vazão é realizado através da válvula agulha V-11. A fim de quantificar a variação da vazão volumétrica em função de parâmetros preestabelecidos no inversor de frequência, foi construída uma curva de resposta da vazão volumétrica em função da frequência de rotação apresentada no inversor de frequência. Para a determinação dessa curva, a bomba BR-1 foi alimentada com água e posteriormente acionada com uma frequência previamente selecionada. As frequências selecionadas para este procedimento foram as seguintes: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 e 65 Hz. A vazão foi quantificada utilizando o medidor de vazão eletromagnético (MV-2). Durante esse procedimento a válvula V-11 ficou totalmente aberta.

Para cada frequência selecionada, a bomba BR-1 era acionada, esperava-se a leitura estabilizar, realizava-se o registro da vazão, selecionava uma outra frequência e posteriormente a bomba era desligada. A seleção da frequência era feita de forma aleatória. Esse procedimento foi reproduzido mais duas vezes, obtendo assim três medidas para cada frequência, sendo uma medida por cada ensaio realizado.

3.3.2 Teste realizado com um condutímetro de bancada

A condutividade elétrica da água está diretamente relacionada com a concentração de solutos dissolvidos na água. A fim de identificar se as medidas determinadas a partir de um condutímetro de bancada são consistentes para quantificar a concentração de Ácido Bórico na seção de testes da montagem experimental, foram realizados testes prévios. Além disso, a realização desse teste visou comparar os valores obtidos com uma solução de água destilada com Ácido Bórico (H_3BO_3) e outra solução de água destilada com Cloreto de Sódio (NaCl), a fim de identificar qual a solução cuja resposta é mais eficiente para técnica em estudo.

Os testes com um condutímetro de bancada foram realizados no laboratório de química da Faculdade Estácio de Recife. As medidas foram obtidas utilizando um condutímetro microprocessado de bancada de marca QUIMIS, modelo Q795M2, e número

de série 12100637, apresentado na Figura 29. Antes da aquisição das medidas, o condutivímetro foi calibrado utilizando uma solução padrão.

Figura 29 – Condutivímetro microprocessado de bancada, de marca QUIMIS.



Para a preparação das soluções foi utilizada uma balança eletrônica para aferir a massa da amostra de Ácido Bórico e de Cloreto de Sódio que, posteriormente, foram diluídas em um volume de 250 ml de água destilada. A balança utilizada foi uma balança eletrônica de precisão de marca OHAUS *Adventurer*, modelo AR2140, e número de série 11.636.063-0, apresentada na Figura 30. O procedimento para a preparação de soluções de água destilada com Ácido Bórico foi o mesmo para a preparação da solução de água destilada com Cloreto de Sódio. As concentrações em estudo foram de 0, 100, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 ppm. Para cada concentração, a solução preparada continha 250 ml, que foi separada em 5 amostras de 50 ml. Uma leitura era obtida para cada 50 ml de solução. Assim, para cada concentração foi obtido um conjunto de 5 medidas, do qual foi determinado uma média e um desvio padrão experimental.

Figura 30 – Balança de precisão, de marca OHAUS.



3.3.3 Curva de calibração da condutividade elétrica em função da concentração de NaCl

Para quantificar a concentração de Cloreto de sódio (NaCl) presente na seção de teste optou-se por determinar a condutividade elétrica de uma amostra e relacionar essa condutividade com a concentração. Por definição, a calibração é o procedimento que estabelece uma relação entre os valores e as incertezas de medição, sendo esta informação utilizada para estabelecer uma relação de modo a obter um resultado da medida a partir de uma indicação (VIM, 2012). Assim, para estabelecer a relação entre condutividade e concentração foi construída uma curva de calibração.

As medidas da condutividade foram realizadas no mesmo sítio da montagem experimental. Neste sítio, a água disponível para as medidas é apenas filtrada, assim, para estimar a influência da água utilizada na medida da condutividade elétrica foi realizado um teste prévio usando quatro amostras de água, sendo as amostras de:

1. água filtrada;
2. água destilada;
3. água ultra pura⁴;
4. água filtrada com uma quantidade inderteminada (aleatória) de NaCl.

Foram depositados 5 litros de água no tanque de boração. O medidor de vazão eletromagnético instalado na montagem experimental MV-1, foi utilizado para estimar a condutividade. Abrindo a válvula V-2 e V-6, a água passava pelo medidor MV-1 e posteriormente era descartada. Ao selecionar um parâmetro de medida da condutividade elétrica, foi possível atribuir valores a condutividade das amostras de água. Esse procedimento foi repetido para as quatro amostras de água citadas. Os valores da condutividade elétrica encontrados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Medida condutividade elétrica de amostras de água.

Água	Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Filtrada	170
Destilada	3
Ultra pura	2
Filtrada com uma quantidade aleatória de NaCl	660

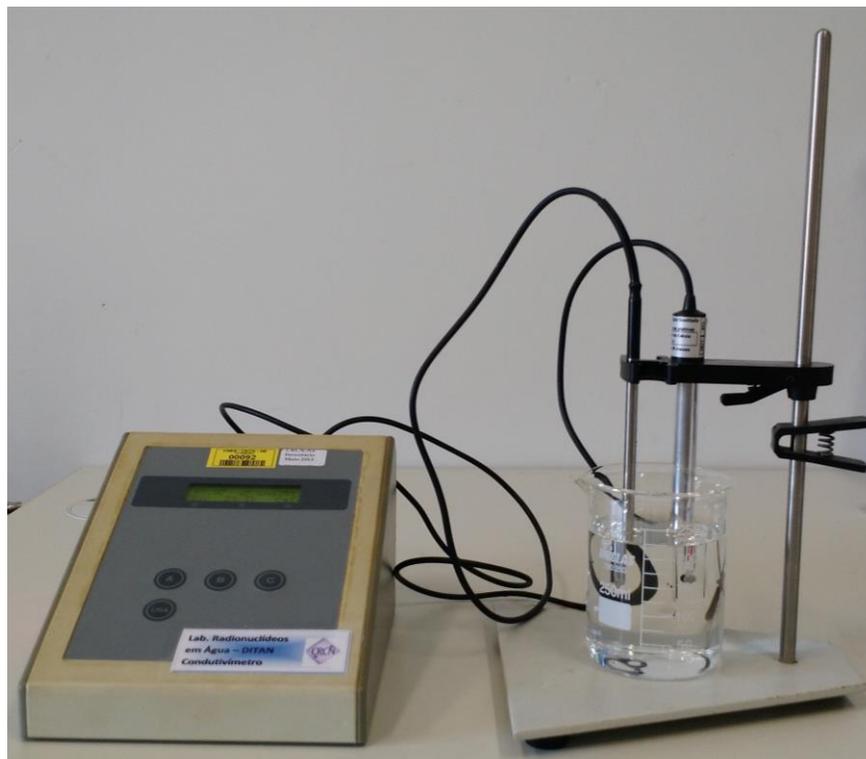
⁴ A produção de água ultra pura, geralmente é feita em dois passos: (i) uma desmineralização utilizando a filtração membranar ou permuta iônica, de maneira a atingir a condutividade de $10 \mu\text{S}/\text{cm}$, e (ii) uma troca iônica de leito misto ou electro-dionização.

A partir dos valores apresentados na Tabela 4, é possível identificar que, para o sistema de detecção utilizado, não há diferença significativa entre os valores de condutividade elétrica apresentados para água destilada e para a água ultra pura. Como o processo de obtenção da água ultra pura requer equipamentos mais sofisticados e a sua produção exige um tempo maior, o uso da água destilada atende as aplicações propostas nesse trabalho.

Ao comparar os valores de condutividade elétrica apresentados para água destilada e para a água filtrada, o intervalo é significativamente maior. Ao optar mais uma vez pelo uso da água destilada, essa escolha implica no aumento do limite de detecção, ou seja, será possível determinar em uma amostra de água destilada uma concentração de NaCl bem menor, quando comparada com uma amostra de água apenas filtrada. Diante desses valores, a curva de calibração da condutividade elétrica em função da concentração de NaCl, assim como a execução de todos os experimentos foram realizados com água destilada.

Para verificar a dependência da condutividade elétrica em função da concentração de NaCl, foram preparadas amostras com concentração entre 100 e 3000 ppm. As medidas foram obtidas utilizando um condutivímetro de bancada de marca CELTAC, modelo FA2104N apresentado na Figura 31. Antes da aquisição das medidas, o condutivímetro foi calibrado utilizando uma solução padrão.

Figura 31 – Condutivímetro microprocessado de bancada, da marca CELTAC.

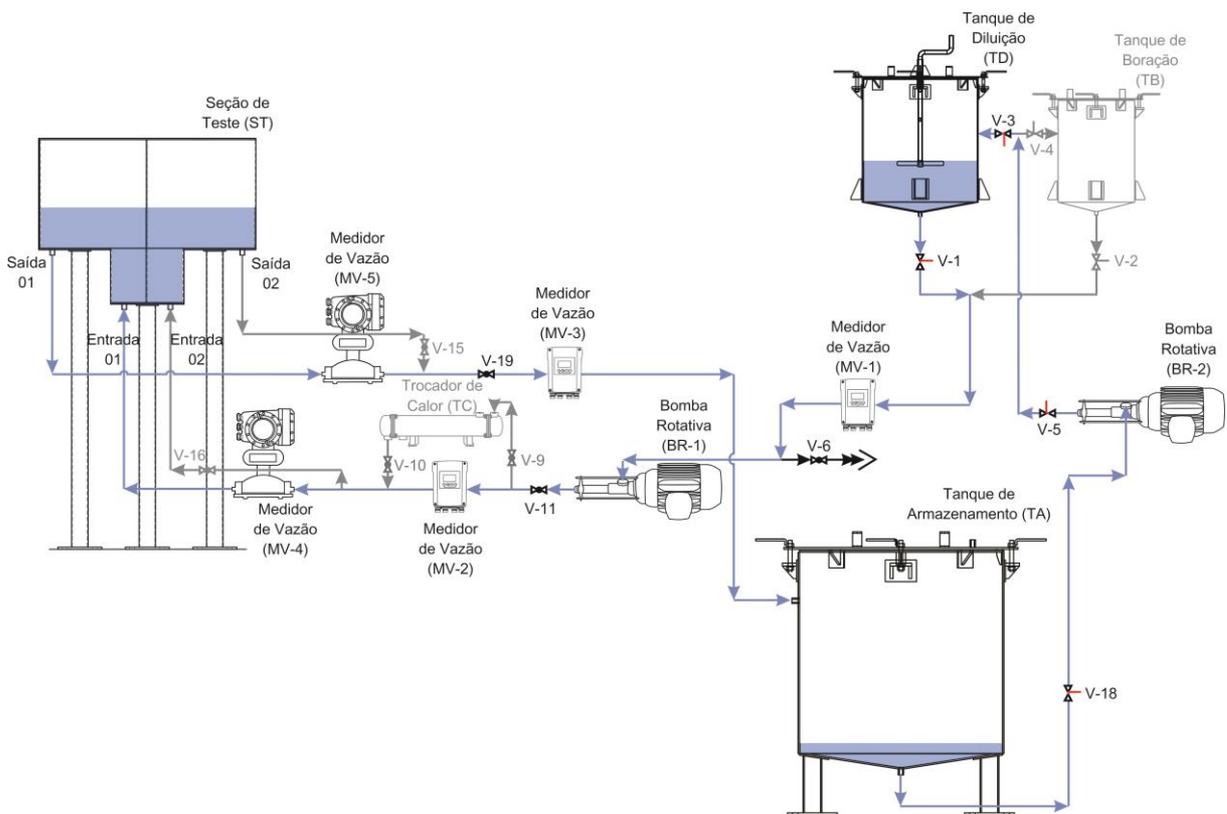


Para a preparação das soluções foi utilizada uma balança eletrônica de precisão para aferir a massa do NaCl que, posteriormente, foram diluídas em um volume de 1 litro de água destilada. As concentrações em estudo foram de 0, 100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 e 3000 ppm. Para cada concentração a solução foi separada em 4 amostras de 250 ml. Uma leitura era obtida para cada 250 ml de solução. Assim, para cada concentração foi obtido um conjunto de 4 medidas, do qual foi determinada uma média e um desvio padrão experimental.

3.3.4 Experimento 01

Para avaliar a potencialidade da montagem experimental para a determinação da concentração do elemento traço injetado na seção de teste, foi inserido uma solução com concentração conhecida no tanque de diluição (TD). Para a realização desse experimento, denominado experimento 01, foi utilizada a configuração da montagem, cuja representação é esquematizada na Figura 32.

Figura 32 – Esquema da montagem experimental durante o experimento 01.



Inicialmente, os tanques e tubulações foram preenchidos com um volume total de água destilada de 92,0 litros, sendo, aproximadamente, 40,5 litros na seção de teste, 28,5 litros no

tanque de diluição, 19,9 litros no tanque de armazenamento e 3,1 litros na tubulação. Durante o preenchimento dos tanques e tubulações fazia-se passar um fluxo contínuo de água destilada e, em seguida, as válvulas eram fechadas garantindo, assim, que as tubulações fossem desaeradas.

Posteriormente, as válvulas V-1, V-11, V-19, V-18, V-5 e V-3 foram abertas. Com isso, a água proveniente do tanque de diluição passa pelo medidor MV-1 e alimenta a bomba BR-1. Passando pela bomba BR-1, a água passa pela válvula V-11, medidores de vazão MV-2 e MV-4, tendo acesso a seção de teste pela entrada 01. A água destilada saía pela saída 01, passava pelo medidor MV-5, válvula V-19 e posteriormente o medidor MV-3, sendo direcionada ao tanque de armazenamento. Como o objetivo principal ao realizar esse experimento foi analisar a viabilidade em quantificar a concentração do elemento traço na entrada e na saída da seção de teste em função do tempo, optou-se por manter as válvulas V-16 e V-15 fechadas. Deste modo, a entrada 02 e a saída 02 permaneceram isoladas durante esse experimento.

A água disposta no tanque de armazenamento alimentava a bomba BR-2, que por sua vez, direcionava a água ao tanque de diluição. Para esse procedimento, as válvulas que dão acesso ao trocador de calor, V-9 e V-10, permaneceram fechadas, já que o experimento foi realizado à temperatura ambiente. Assim como as válvulas V-2 e V-4, que dão acesso ao tanque de boração, visto que esse tanque não foi utilizado durante o experimento 01.

Durante esse processo, foram feitos ajustes nas válvulas V-11 e V-19 de modo a obter a vazão volumétrica constante de aproximadamente 10,6 litros por hora na entrada 01 e saída 01 da seção de teste. Após obter o equilíbrio da vazão na entrada e na saída, foi diluída uma amostra de NaCl no tanque de diluição. A quantidade diluída corresponde a um montante que ao término do processo de diluição e homogeneização toda a água disponível no circuito teria uma concentração de NaCl da ordem de 1000 ppm.

Para determinar a concentração de NaCl que chegava e saía da seção de teste, foram retiradas concomitantemente duas amostras de 100 ml, cada uma. Uma amostra foi retirada do circuito através de uma bifurcação que antecede a válvula V-11 e outra amostra foi retirada entre o medidor MV-3 e o tanque de armazenamento. A coleta dessas amostras foi realizada a cada 10 minutos durante um intervalo de aproximadamente 3 horas.

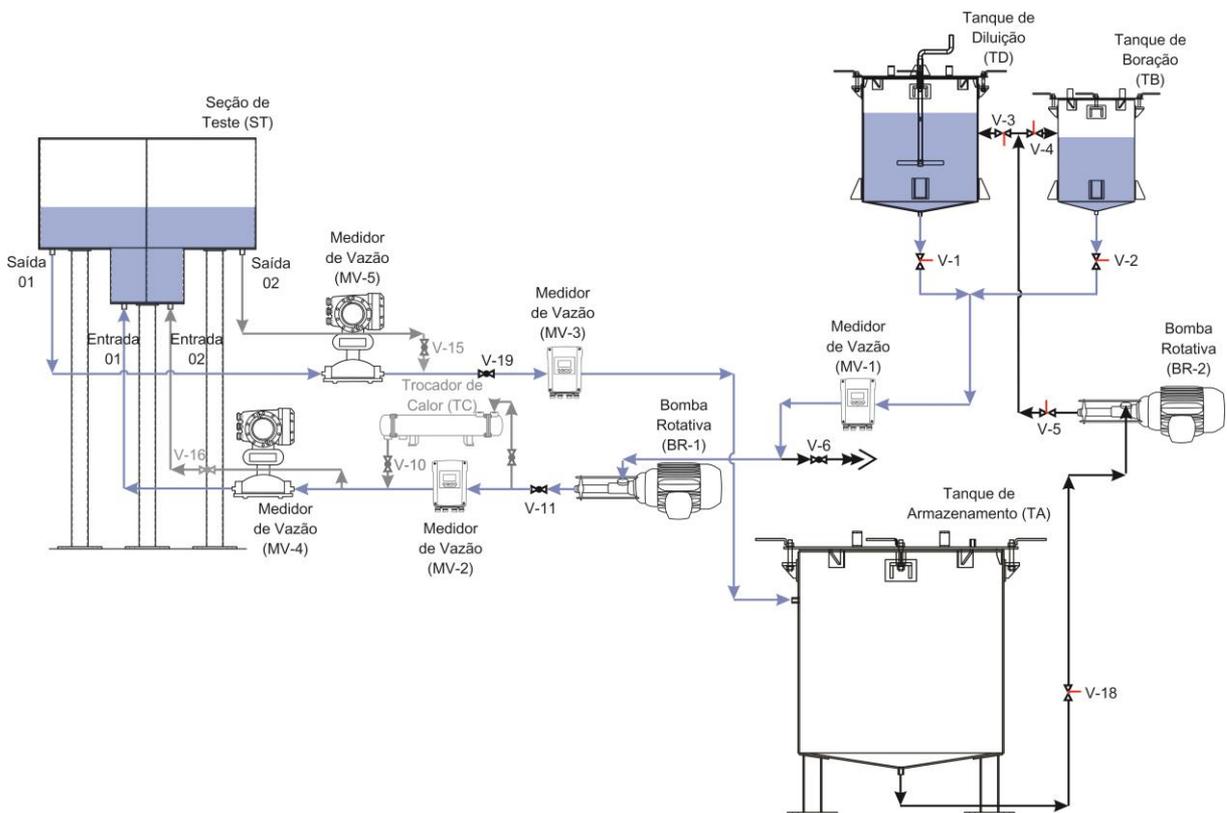
Utilizando o condutivímetro microprocessado de bancada da CELTAC (Figura 31), devidamente calibrado com uma solução padrão, foram realizadas três medidas da condutividade elétrica para cada amostra de 100 ml. Dessas medidas foram subtraídas do valor correspondente à medida referente a condutividade da água destilada. Posteriormente, foi

determinada a concentração equivalente através da curva de calibração da condutividade elétrica em função da concentração.

3.3.5 Experimento 02

Para a realização do experimento 02 buscou-se representar um cenário em que a seção de teste dispunha apenas de água destilada e, em seguida, seria alimentada constantemente com uma solução com concentração de um elemento traço que pudesse ser determinada. Este cenário estaria associado a uma boração. A configuração da montagem experimental durante o experimento 02 é representada na Figura 33.

Figura 33 – Esquema da montagem experimental durante o experimento 02.



Para esse experimento, a seção de teste, o tanque de boração e o tanque de diluição foram preenchidos com água destilada com um volume equivalente a 40,5, 60,0 e 100,0 litros, respectivamente. O preenchimento desses tanques e das tubulações da montagem foi cuidadosamente realizado, garantindo que as tubulações fossem desaeradas. O tanque de armazenamento foi utilizado como reservatório para acondicionar a água proveniente da seção de teste.

Com as válvulas V-2, V-11 e V-19 abertas foi estabelecido um fluxo constante de entrada e saída as seção de teste. Durante esse procedimento, a válvula V-1 permaneceu fechada. O volume de 100,0 litros de água destilada do tanque de diluição foi utilizado para preparar uma solução cuja concentração foi de, aproximadamente, 1000 ppm. Após a preparação dessa solução, a válvula V-2 foi fechada e a válvula V-1 foi aberta, interrompendo a alimentação de água destilada no circuito e inserindo uma solução com uma concentração conhecida que alimentou a ST durante todo o experimento 02.

A água do tanque de diluição, passa pelo medidor MV-1, alimenta a bomba BR-1, passa pelos medidores MV-2 e MV-4 e chega a entrada 01 da ST. A mistura passa pela saída 01, medidores MV-5 e MV-3 e é depositada no tanque de armazenamento (TA). Após a abertura da válvula V-1, foi realizado pequenos ajustes nas válvulas V-11 e V-19 para equilibrar a vazão de entrada e saída. Durante o experimento 02, a vazão média foi de 10,4 litros por hora. Para manter esse valor, foram feitas reposições de soluções de água com concentração de 1000 ppm no tanque de diluição.

Para quantificar a concentração, a cada 10 min foi retirada uma amostra de 100 ml da entrada e 100 ml da saída durante um intervalo de 180 min. Dessas amostras foram determinadas a condutividade elétrica (utilizando o condutivímetro microprocessado de bancada da CELTAC, devidamente calibrado) e assim estimada a concentração do elemento traço.

3.3.6 Experimento 03

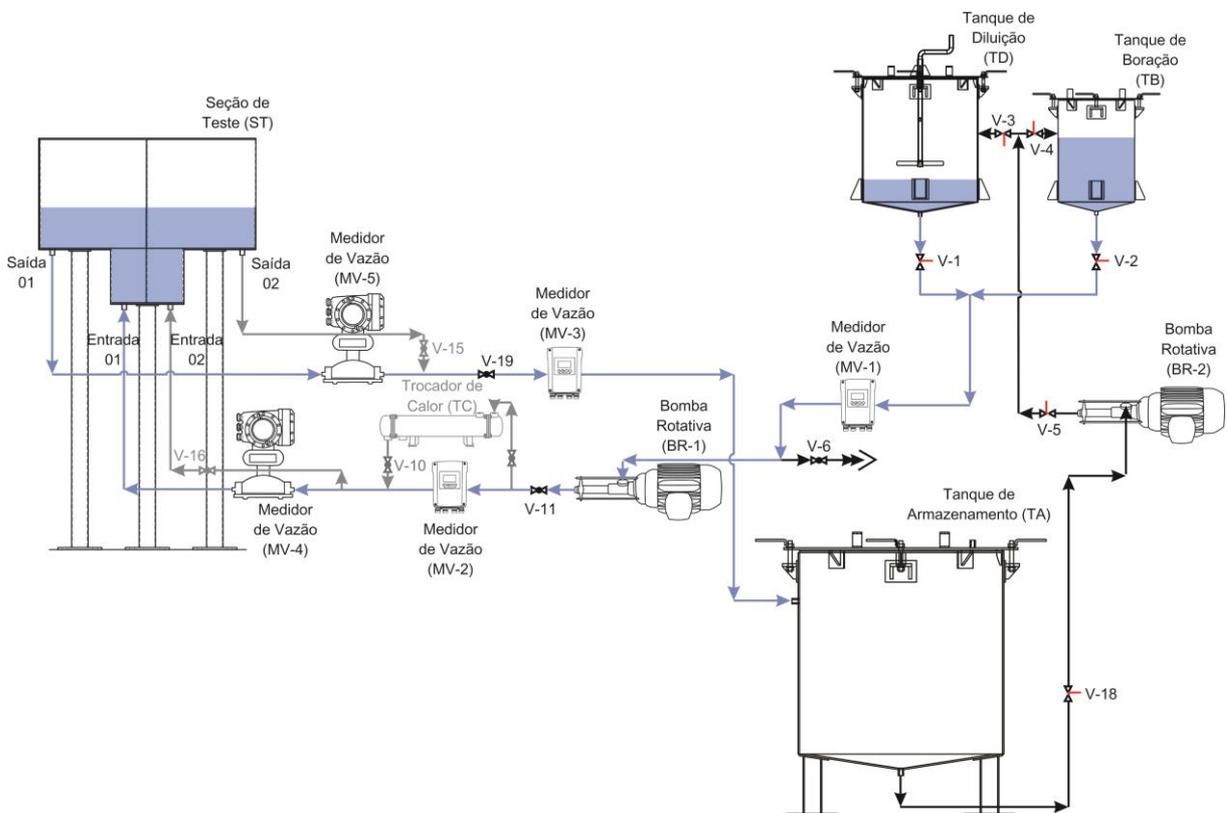
No experimento 03 buscou-se representar um cenário de deborção. Para isso, a seção de teste (ST) foi preenchida com um volume equivalente a 40,5 litros de uma solução com uma concentração de NaCl correspondente à 1000 ppm. Após estabelecer uma equivalência entre a vazão volumétrica na entrada e saída da seção de teste, foi inserida um fluxo constante de água destilada na ST. Assim, a concentração da seção de teste diminuiria gradativamente. A configuração da montagem experimental durante a realização do experimento 03 é representada na Figura 34.

No início do experimento as válvulas V-1, V-11 e V-19 foram abertas. Com esse procedimento a água do tanque de diluição (que continha uma solução com a mesma concentração que a seção de teste) passava pelo medidor MV-1, alimentava a bomba BR-1, passava pelos medidores MV-2 e MV-4 e chegava à ST pela entrada 01. Pela saída 01, a solução passava pelos medidores MV-5 e MV-3 e era direcionada ao tanque de armazenamento (TA).

Nesse experimento o TA também foi utilizado como reservatório para acondicionar a solução, de modo que durante o experimento a solução do TA não retorna a seção de teste.

Quando a vazão volumétrica foi estabilizada em 8,4 litros por hora a válvula V-1 foi fechada e, concomitantemente, a válvula V-2 foi aberta. Com isso, a seção de teste era alimentada com apenas água destilada. Para quantificar a concentração na entrada e na saída da seção, foram retiradas amostras com 100 ml a cada 10 minutos por um intervalo de 180 minutos. A condutividade elétrica dessas amostras foi determinada utilizando o condutímetro microprocessado de bancada da CELTAC e, a partir de uma curva de calibração, foi estimada a concentração de NaCl.

Figura 34 – Esquema da montagem experimental durante o experimento 03.

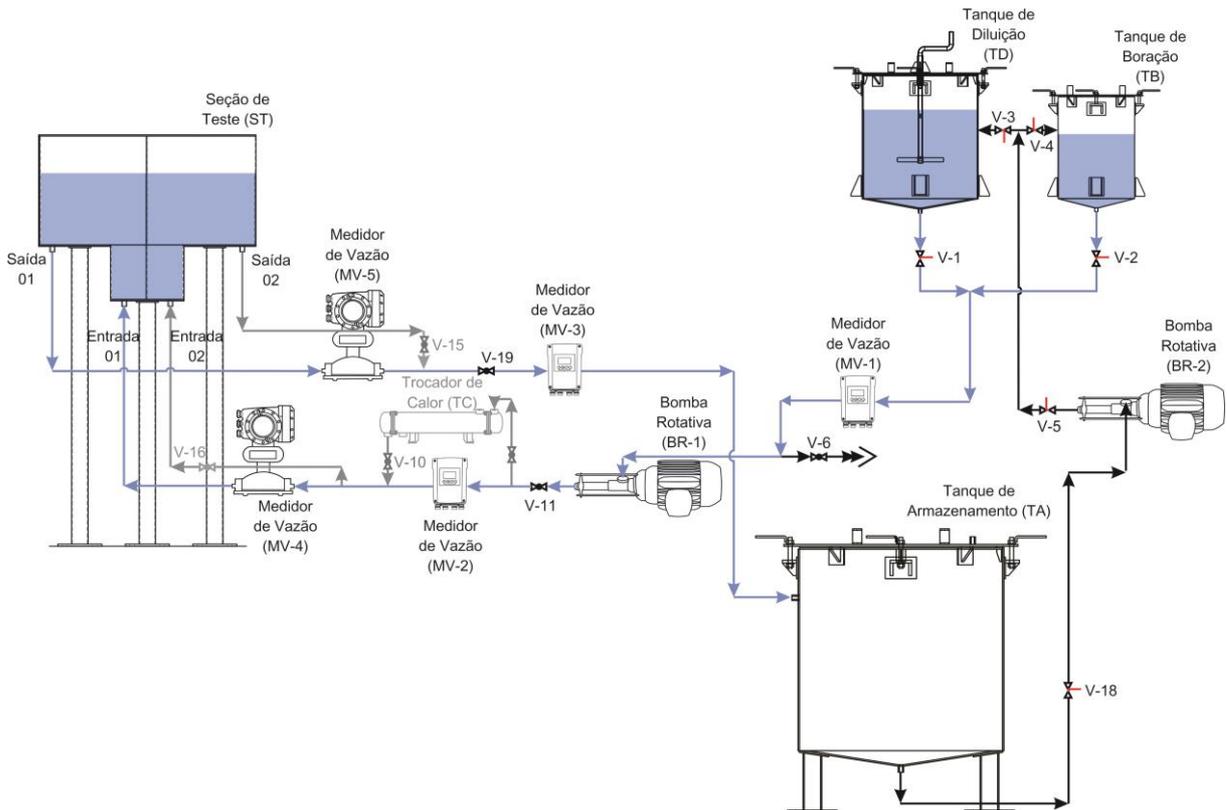


3.3.7 Experimento 04

Para investigar o comportamento da diluição quando a seção de teste continha um volume diferente do preestabelecido, foi determinada a medida da concentração da solução traço durante um cenário de boração com a seção de teste operando com 80% de sua capacidade máxima, ou seja, com um volume correspondente a 73,6 litros. Para essa representação, a seção de teste inicialmente tinha apenas água destilada, sendo alimentada com água destilada do

tanque de boração. Após estabelecer a equivalência entre a vazão volumétrica na entrada e na saída da seção, foi cessada a alimentação de água destilada e a ST foi alimentada com uma solução de água destilada com NaCl com uma concentração de aproximadamente 1500 ppm. A configuração da montagem experimental durante o experimento 04 é representada na Figura 35.

Figura 35 – Esquema da montagem experimental durante o experimento 04.



No início do experimento 04, as válvulas V-2, V-11 e V-19 estavam abertas. Assim, a água destilada que estava no tanque de boração passava pelo medidor MV-1, alimentava a bomba BR-1, passava pelos medidores MV-2 e MV-4 e chegava à ST pela entrada 01. Pela saída 01, a água destilada passava pelos medidores MV-5 e MV-3 e era direcionada ao tanque de armazenamento (TA). Quando a vazão estava em torno de 14 litros por hora, a válvula V-2 foi fechada e a válvula V-1 foi aberta, incorporando no circuito a solução de água com NaCl a uma concentração de aproximadamente 1500 ppm.

Para determinar a concentração, uma amostra de 100 ml foi retirada antes da entrada e outras amostras de 100 ml após a saída da seção de teste a cada 10 minutos durante um intervalo de 300 minutos. De cada amostra, foram realizadas 3 medidas da condutividade elétrica,

utilizando o condutivímetro multiprocessado de bancada da CELTAC, devidamente calibrado. A partir de uma curva de calibração, essas medidas foram convertidas com concentração.

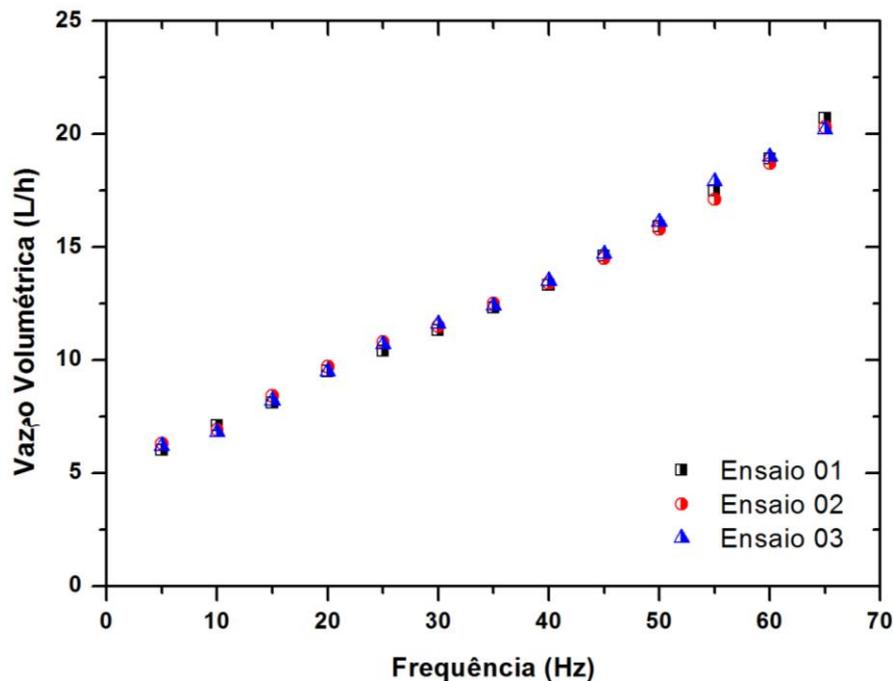
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados da implementação de uma instalação experimental destinada para o estudo da dispersão de Boro em um reator modular compacto integral. Os resultados são: a curva de vazão volumétrica em função da frequência de rotação da bomba BR-1 e a curva de calibração da condutividade elétrica em função da concentração. Em seguida, os valores da concentração do elemento traço no decorrer do tempo determinados durante a realização dos experimentos. Para os experimentos 02, 03 e 04 são apresentados os valores de concentração determinados teoricamente.

4.1 Vazão volumétrica em função da frequência de rotação da bomba BR-1

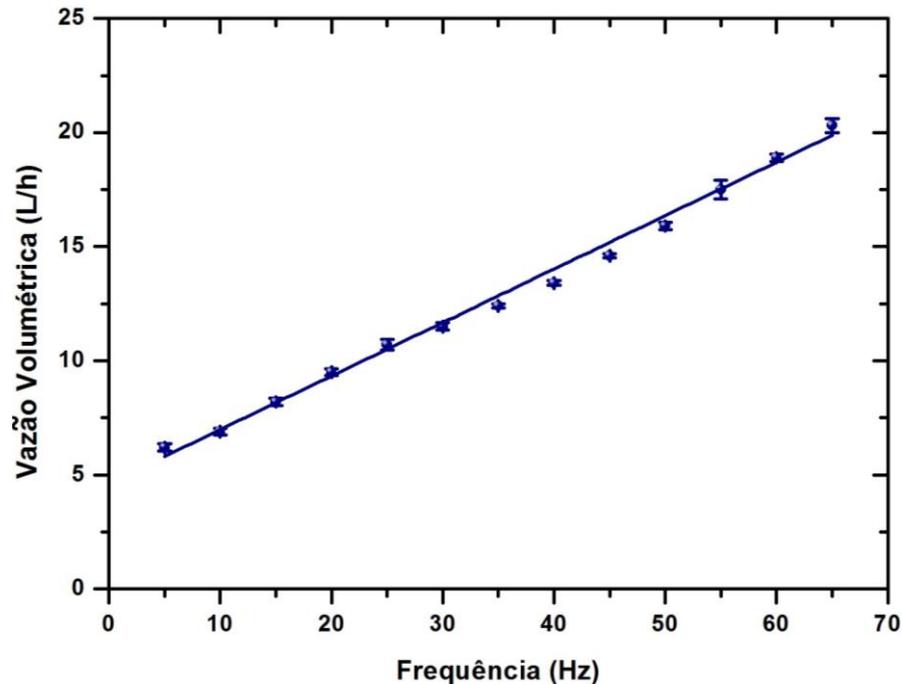
Para identificar os parâmetros a serem estabelecidos no inversor de frequência de modo a obter uma vazão volumétrica conhecida, foi construída uma curva de resposta da vazão volumétrica em função da frequência de rotação da bomba apresentada no inversor de frequência. Na Figura 36 é possível visualizar a dependência da vazão volumétrica (em litros por hora) em função da frequência de rotação (em *hertz*) indicada no inversor de frequência que controla a bomba BR-1 para cada ensaio realizado.

Figura 36 – Vazão volumétrica em função da frequência da bomba BR-1.



A representação do comportamento apresentado na Figura 36 em função da média referente aos três ensaios mais ou menos o desvio padrão experimental é apresentado na Figura 37. Para esses valores foi realizado um ajuste linear.

Figura 37 – Vazão volumétrica média em função da frequência da bomba BR-1.



Para o ajuste linear apresentado na Figura 37, o coeficiente angular (α) e o coeficiente de correlação linear quadrático (R^2) são, respectivamente, 0,234 e 0,995. Para um ajuste linear, o ponto de interseção foi de 4,644 litros por hora. Essas medidas caracterizam uma dependência linear entre a frequência e a vazão volumétrica. Assim, para selecionar uma vazão de 15 litros por hora, a frequência selecionada no inversor de frequência será, aproximadamente, 45 Hz.

4.2 Teste realizado com um condutivímetro de bancada

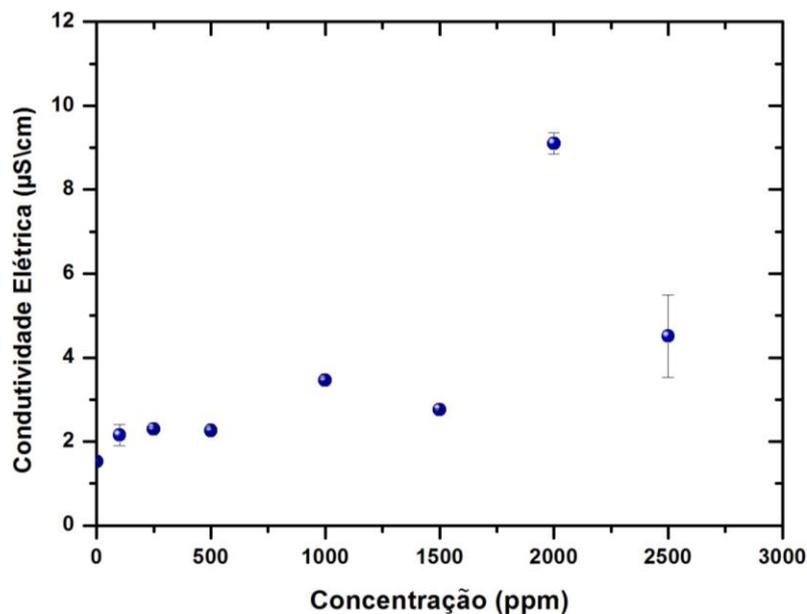
A concentração (em ppm) e os valores médios mais ou menos o desvio padrão experimental referentes à condutividade elétrica das soluções de água destilada com Ácido Bórico são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Concentração (em ppm) de Ácido Bórico em água destilada e o valor médio e desvio padrão experimental da condutividade elétrica(em $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Concentração (ppm)	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	
	Média	Desvio Padrão Experimental
0	1,53	0,06
100	2,15	0,25
250	2,30	0,05
500	2,26	0,08
1000	3,46	0,08
1500	2,76	0,03
2000	9,10	0,25
2500	4,51	0,98

A partir dos valores apresentados na Tabela 5, foi construído o gráfico da condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) em função da concentração (ppm), Figura 38.

Figura 38 – Condutividade elétrica da solução de Ácido Bórico em água destilada em função concentração de Ácido Bórico na solução.



A partir da Figura 38 é possível verificar que não há linearidade entre a condutividade elétrica e a concentração de uma solução de água destilada com Ácido Bórico. Esse resultado pode estar associado ao fato do Ácido Bórico ser considerado um ácido fraco, sendo esta

classificação referente ao grau de ionização (α) do ácido em uma solução aquosa. O grau de ionização é determinado pela relação apresentada na equação 1.

$$\alpha = \frac{\text{número de moléculas ionizadas}}{\text{número de moléculas dissolvidas}} \quad (1)$$

O valor referente ao grau de ionização pode variar de 0 a 1, podendo ser expresso em porcentagem. Quando α é maior ou igual a 50%, o ácido é considerado um ácido forte; se for maior que 5% e menor que 50%, é um ácido moderado; e menor que 5% o ácido é considerado fraco. O Ácido Bórico tem um α igual a 0,075%. Quanto maior o grau de ionização, maior será a condutividade elétrica, pois o ácido possuirá mais íons dissolvidos na solução. Com essa informação, aliada à dependência da condutividade em função da concentração, a quantificação da concentração de Ácido Bórico na solução aquosa por meio da medida da condutividade torna-se inviável.

A concentração (em ppm) e os valores médios mais ou menos o desvio padrão experimental referentes à condutividade elétrica das soluções de água destilada com Cloreto de Sódio são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Concentração (em ppm) de Cloreto de Sódio em água destilada e o valor médio e desvio padrão experimental da condutividade elétrica (em mS/cm).

Concentração (ppm)	Condutividade Elétrica (mS/cm)	
	Média	Desvio Padrão Experimental
0	0,002	0,000
250	0,540	0,003
500	1,085	0,005
1000	2,102	0,035
1500	3,080	0,017
2000	4,066	0,009
2500	4,992	0,013

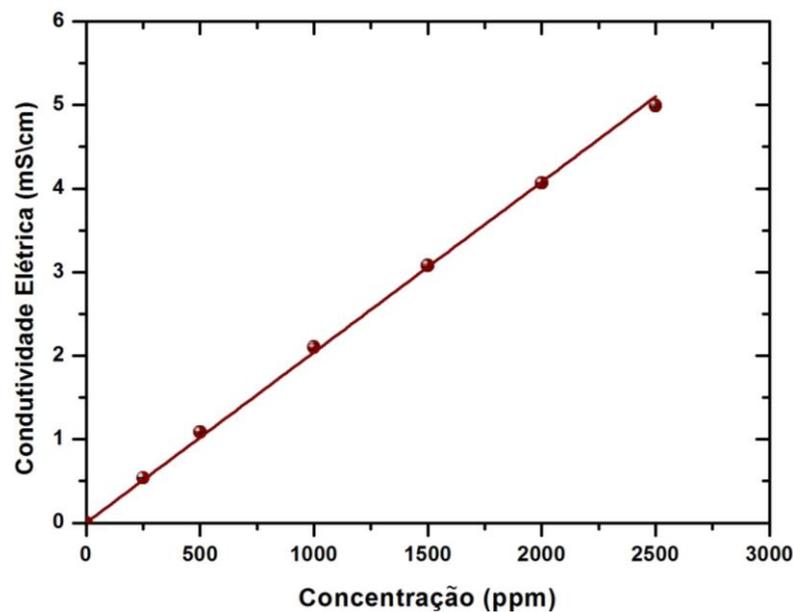
A partir dos valores apresentados na Tabela 6, foi construído o gráfico da condutividade elétrica (mS/cm) em função da concentração (ppm), Figura 39.

Para o ajuste linear apresentado na Figura 39, o coeficiente angular (α) e o coeficiente de correlação linear (R^2) são, respectivamente, 0,002 e 0,999. Essas medidas caracterizam uma

dependência linear entre a condutividade elétrica e a concentração de Cloreto de Sódio em uma solução, viabilizando a utilização dessa técnica para determinar a concentração.

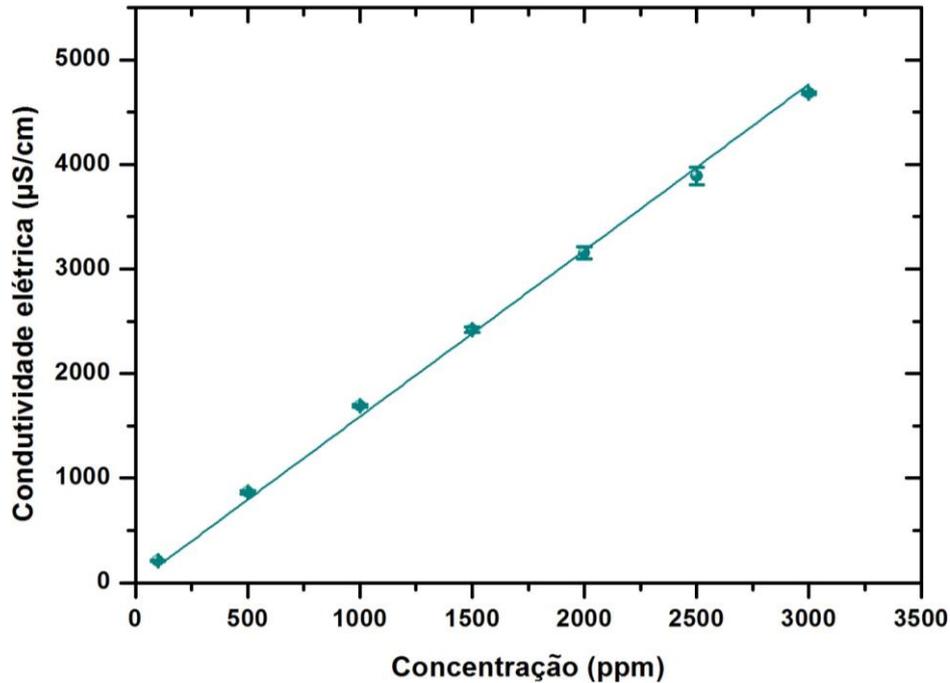
A utilização da técnica de medida da condutividade do Cloreto de Sódio já é utilizada para estudar eventos de diluição de Ácido Bórico em reatores nucleares do tipo PWR (KLIEM; ROHDE; WEISS, 2004; KLIEM et al., 2008; DURY; HEMSTRÖM; SHEPEL, 2008; HÖHNE et al., 2008; TESCHENDORFF; UMMINGER; WEISS, 2001).

Figura 39 – Condutividade elétrica da solução de Cloreto de Sódio em água destilada em função concentração de Cloreto de Sódio na solução.



4.3 Curva de calibração da condutividade elétrica em função da concentração de NaCl

A Figura 40 apresenta uma curva de calibração da condutividade elétrica em função da concentração de NaCl para o intervalo de 100 a 3000 ppm. Os valores correspondente ao coeficiente angular (α) e o coeficiente de correlação linear (R^2) referentes à curva de calibração apresentada na Figura 40, são, respectivamente, 1,59 e 0,998. O coeficiente de correlação linear apresentado é característico de um comportamento linear entre a condutividade elétrica e a concentração de Cloreto de Sódio. A curva apresentada na Figura 40 foi utilizada para quantificar a concentração de NaCl durante os experimentos realizados neste trabalho.

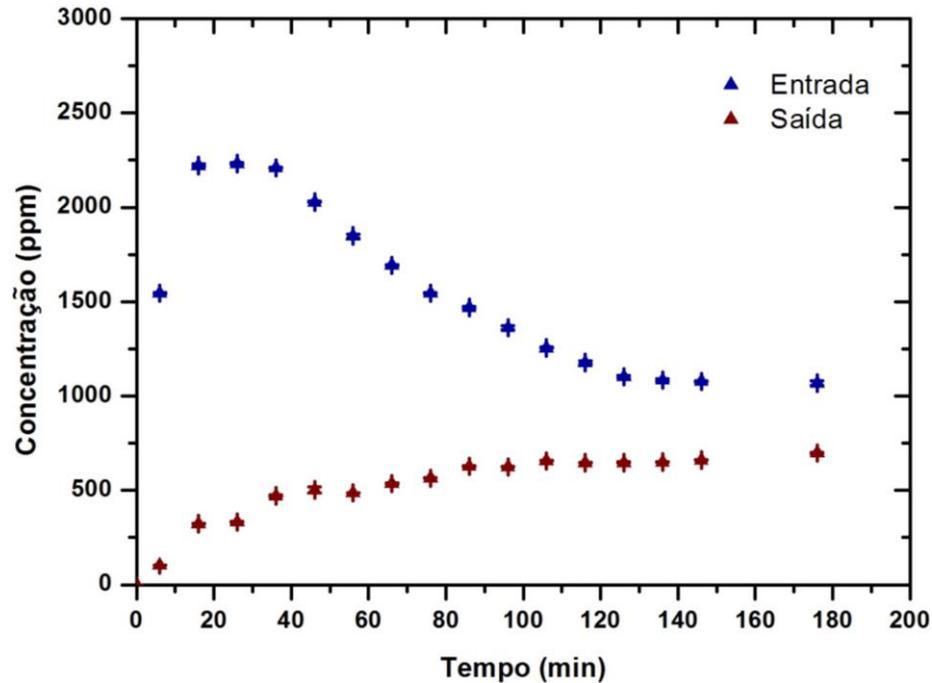
Figura 40 – Condutividade elétrica em função concentração de NaCl.

4.4 Experimento 01

O estudo referente a potencialidade da instalação experimental para a determinação da concentração do elemento traço injetado na seção de teste permitiu identificar a concentração na entrada e na saída da seção de teste durante um intervalo de aproximadamente 180 minutos. Os valores médios referente às três medidas da condutividade das amostras de 100 ml retiradas da entrada e da saída da seção de teste foram convertidas em concentração a partir da curva de calibração apresentada na seção 4.3. A concentração média em função do tempo é apresentada na Figura 41. As leituras em tons de azul correspondem a concentração medida na entrada da seção de teste, já as leituras em tons de vermelho correspondem a concentração da saída.

A Figura 41 mostra que, durante os primeiros 30 minutos de execução do experimento 01, há um aumento na concentração na entrada da seção chegando até 2250 ppm. Em seguida há uma diminuição nos valores da concentração da entrada que tende à estabilidade para valores em torno de 1000 ppm. As medidas obtidas nesse experimento apresentam um comportamento já esperado, visto que a diluição do material traço foi realizada no tanque de diluição e o cálculo foi feito de modo que, após a homogeneização, a concentração em todo o circuito correspondesse à 1000 ppm. Assim, a concentração inicialmente teria valores mais elevados e posteriormente seria estabilizada.

Figura 41 – Concentração média na entrada e na saída da seção de teste, mais ou menos o desvio padrão experimental em função do tempo, determinada durante o experimento 01.

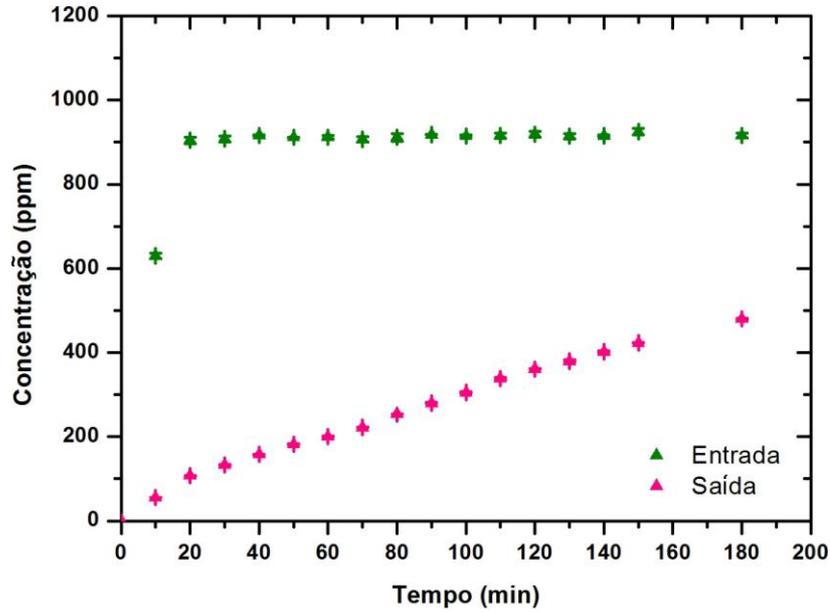


O resultado encontrado nesse experimento consolida a técnica aplicada para a medida da concentração, visto que, para os valores referente às concentrações na saída da seção de teste, é possível observar que há um aumento da concentração durante o intervalo de tempo estudado, tendendo a estabilizar quando a concentração está por volta de 1000 ppm.

4.5 Experimento 02

A representação de um cenário de boração realizado na instalação experimental permitiu identificar a concentração na entrada e na saída da seção de teste durante um intervalo de 180 minutos. A concentração média determinada para as três leituras, mais ou menos o desvio padrão experimental, em função do tempo é apresentada na Figura 42.

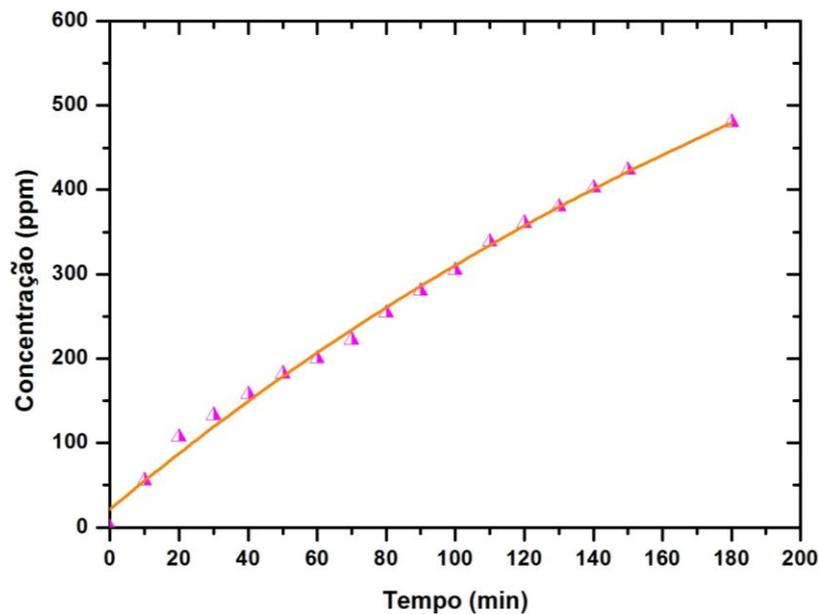
Figura 42 – Concentração média mais ou menos o desvio padrão experimental em função do tempo, determinada durante o experimento 02.



As leituras em tons verde correspondem à concentração determinada na entrada da seção de teste, já as leituras em tons magenta correspondem a concentração da saída.

Para analisar a concentração média na saída da seção de teste, foi realizado um ajuste de uma função exponencial de primeira ordem, cuja representação é apresentada na Figura 43.

Figura 43 – Concentração média na saída em função do tempo, determinada durante o experimento 02.



A função que se ajusta ao dados experimentais é apresentada na Equação (2). Em que C é a concentração, em ppm, e t o tempo, em minutos. O fator de correlação, R^2 , encontrado para esse ajuste foi 0,994.

$$C = 998,14 - 976,80 \cdot e^{-\left(\frac{1}{284,67}\right)t} \quad (2)$$

De acordo com Silva (2008), a concentração, C' , em função do tempo, t , pode ser determinada, a partir da Equação (3).

$$C' = C_E + (C_0 - C_E) \cdot e^{-\alpha t} \quad (3)$$

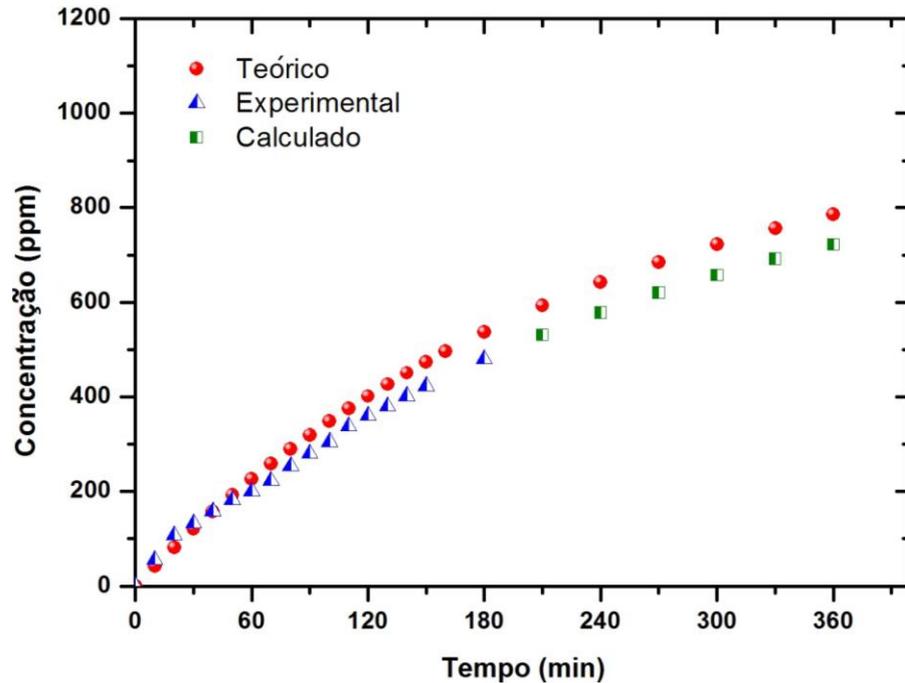
Em que, C_E representa uma concentração inicial (de valor constante) proveniente de um reservatório externo que é responsável pela variação de concentração do primário, C_0 é a concentração inicial de Boro na água do primário e o fator α , a relação entre a vazão mássica, w' , e a massa do primário M' . Assim:

$$\alpha = \frac{w'}{M'} \quad (4)$$

Para a realização do experimento 02, a concentração inicial inserida proveniente de um reservatório externo, ou seja, do tanque de diluição, foi $C_E = 1000 \text{ ppm}$. A concentração inicial de Boro na água, neste caso, da seção de teste foi de $C_0 = 0$. A vazão volumétrica adquirida durante o experimento 02 foi de, aproximadamente, 10,4 litros por hora; e o volume na seção de teste, foi de 40,5 litros. Com esses parâmetros foi possível determinar a concentração teórica ao longo de 6 horas, a fim de comparar os resultados teóricos com os valores encontrados mediante a realização do experimento.

Como o experimento 02 foi realizado no decorrer de 3 horas, a Equação (2) foi utilizada para estimar os valores da concentração para o tempo entre 3 e 6 horas. Os valores da concentração, determinados a partir da Equação (3), denominados de valores teóricos, os valores experimentais da saída, e os determinados pela Equação (2) em função do tempo são apresentados na Figura 44.

Figura 44 – Concentração em função do tempo durante o experimento 02, determinada a partir do desenvolvimento teórico, experimental e pela curva de ajuste.

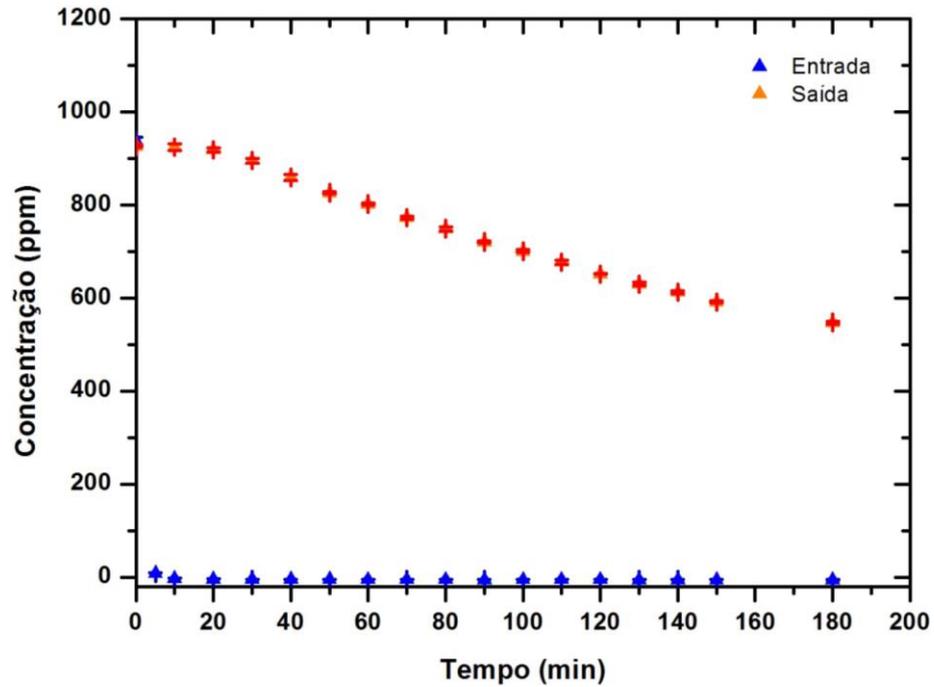


Comparando os valores teóricos com os valores experimentais, a variação percentual entre eles foi em torno de 10 %.

4.6 Experimento 03

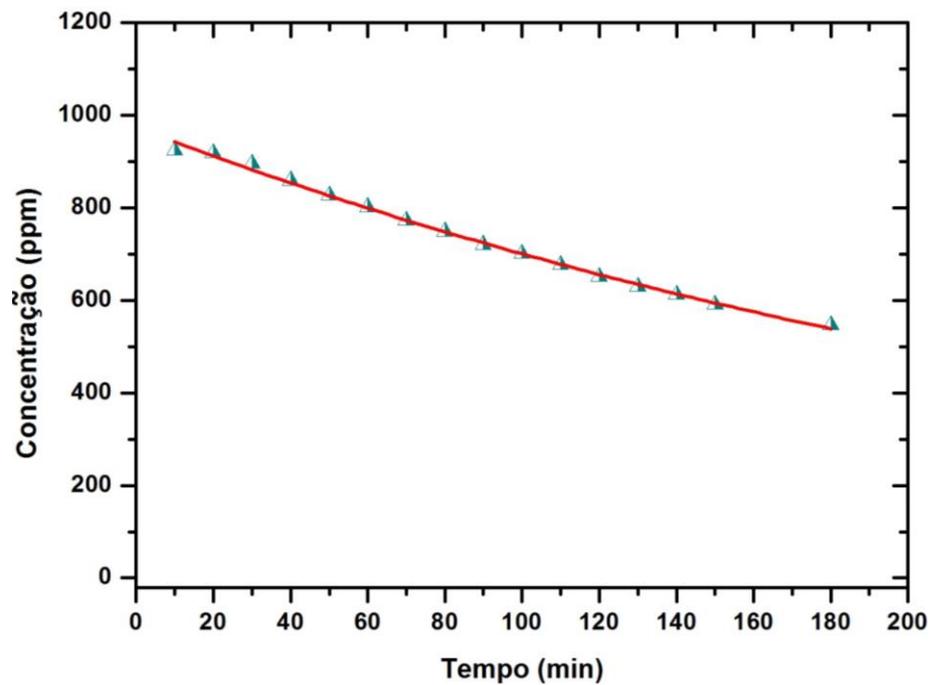
Para a representação de um cenário de deborção realizado na instalação experimental, a seção de teste foi preenchida com um volume de 40,5 litros de água destilada com uma concentração de 1000 ppm da substância traço. Durante esse experimento, uma vazão volumétrica constante de 8,4 litros por hora de água destilada foi inserida na seção de teste. A concentração na entrada e na saída da seção de teste foi determinada durante um intervalo de 180 minutos. Os valores médios da concentração mais ou menos o desvio padrão experimental das três leituras, tanto na entrada como na saída, em função do tempo são apresentados na Figura 45.

Figura 45 – Concentração média em função do tempo, determinada durante o experimento 03.



Para analisar a concentração média na saída da seção de teste, foi realizado um ajuste de uma função exponencial de primeira ordem, cuja representação é apresentada na Figura 46.

Figura 46 – Concentração média na saída em função do tempo, determinada durante o experimento 03.

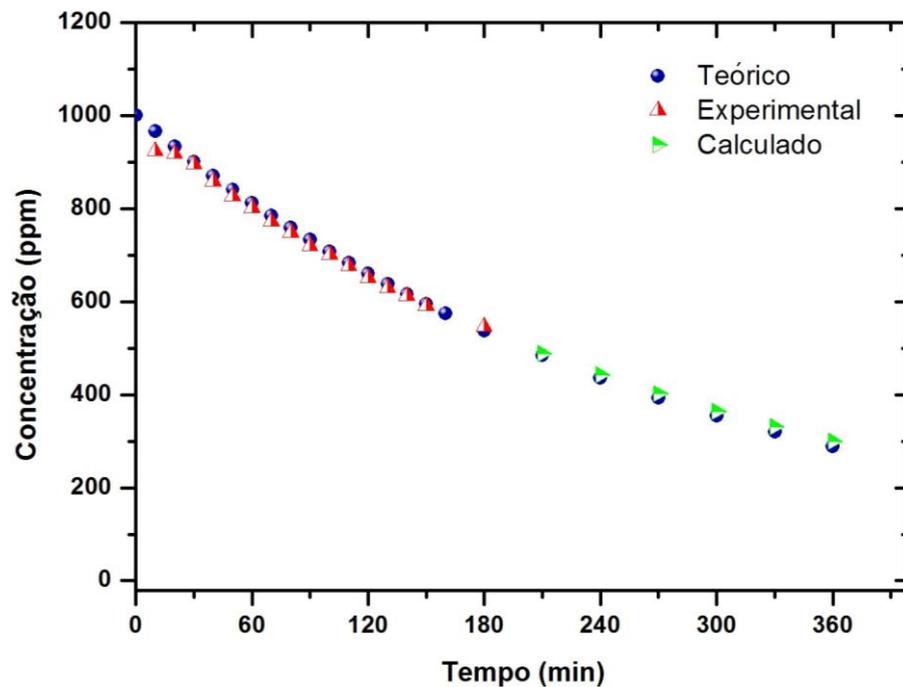


A função que se ajusta aos dados experimentais é apresentada na Equação (2). Em que C é a concentração, em ppm, e t o tempo, em minutos. O fator de correlação, R^2 , encontrado para esse ajuste foi 0,996.

$$C = 11,71 + 962,43 \cdot e^{-\left(\frac{1}{299,00}\right)t} \quad (5)$$

Como esse experimento foi realizado durante o intervalo de 3 horas, a Equação (5) foi utilizada para estimar os valores de concentração para os intervalos de tempo entre 3 e 6 horas. Os valores teóricos da concentração, os valores de concentração determinados experimentalmente na saída da seção de teste, e os determinados a partir da Equação (5) em função do tempo são apresentados na Figura 44.

Figura 47 – Concentração em função do tempo durante o experimento 03, determinada a partir do desenvolvimento teórico, experimental e pela curva de ajuste.

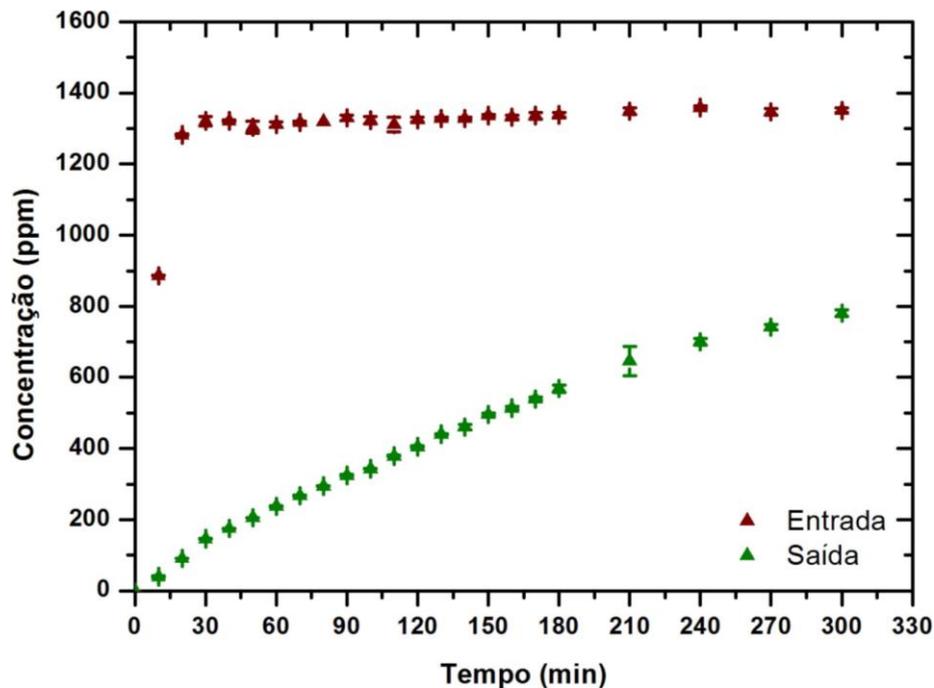


Ao comparar os resultados experimentais com o resultado teórico, foi possível verificar que os valores não apresentaram uma variação percentual maior que 5%.

4.7 Experimento 04

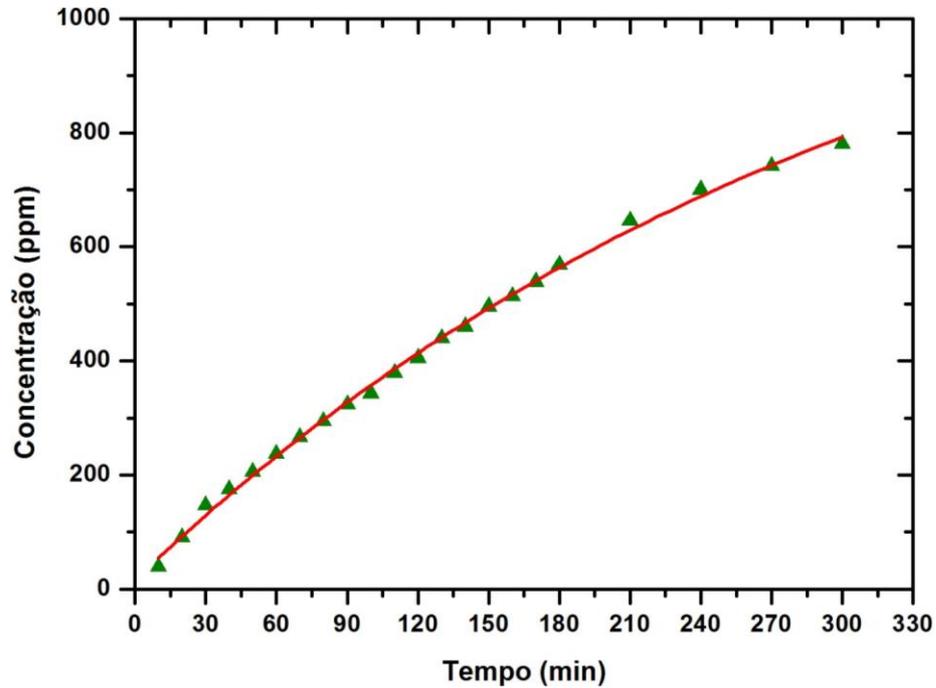
O experimento 04 foi realizado visando a representação de um cenário de boração. Para esse experimento, a vazão volumétrica média na entrada e saída da seção de teste foi mantida à 14 litros por hora. A seção de teste operou com água a 80 % de sua capacidade, ou seja, com um valor correspondente à 73,6 litros, com uma concentração inicial de 0 ppm. No decorrer do experimento, foi inserida água com uma concentração da substância traço correspondente à 1500 ppm. Os valores da concentração média para as três leituras em função do tempo, durante um intervalo de 300 minutos, são apresentados na Figura 48. Nessa figura, também é possível observar a barra que delimita o desvio padrão experimental para cada conjunto de três medidas.

Figura 48 – Concentração média em função do tempo, determinada durante o experimento 04.



Para analisar o comportamento com base na concentração que está saindo da seção de teste, foi feito um ajuste de uma função exponencial aos dados determinados durante a execução do experimento 04. Na Figura 49 é possível visualizar os dados referente à concentração da substância traço na saída e a curva de ajuste.

Figura 49 – Concentração média na saída da seção de teste em função do tempo, determinada durante o experimento 04.

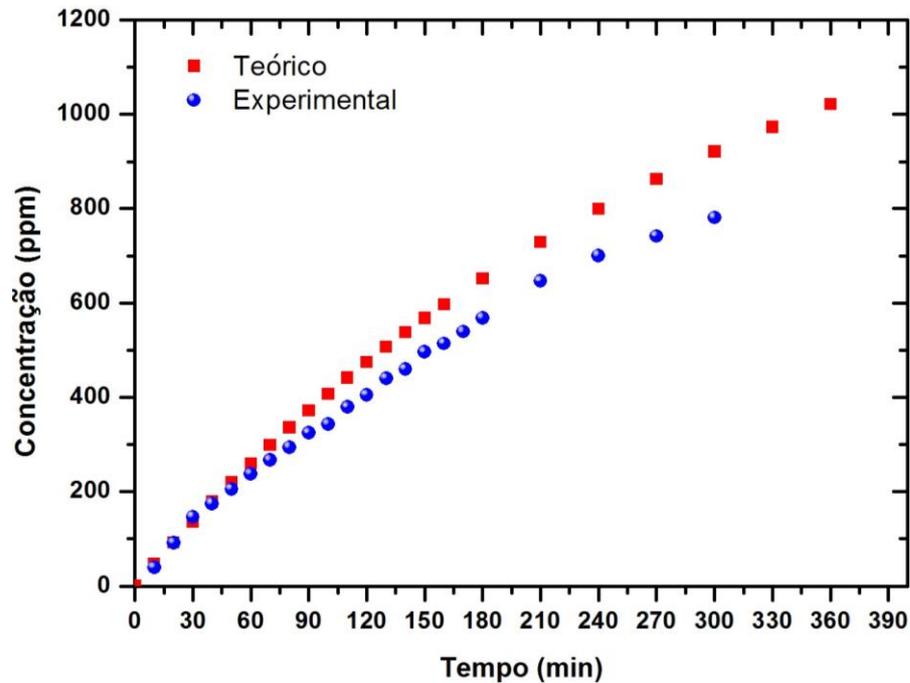


A função que se ajusta ao dados experimentais referente ao experimento 04 é apresentada na Equação (6). Em que C é a concentração, em ppm, e t o tempo, em minutos. O fator de correlação, R^2 , encontrado para esse ajuste foi 0,998.

$$C = 1305,27 - 1289,47 \cdot e^{-\left(\frac{1}{325,24}\right)t} \quad (6)$$

A fim de comparar os dados experimentais com os dados teóricos, foi construído o gráfico da concentração em função do tempo para os valores obtidos para o experimento 04 (Figura 50). Ao comparar os resultados experimentais com os resultados teóricos, foi possível verificar que os valores apresentaram uma variação de até 13%.

Figura 50 – Concentração em função do tempo durante o experimento 04, determinada a partir do desenvolvimento teórico e experimental.



4.8 Comparação entre os experimentos 02, 03 e 04

Os experimentos realizados com inserção constante de uma substância traço foram os experimentos 02, 03 e 04. A fim de sintetizar os resultados encontrados, foi construída a Tabela 7 para apresentar as características que delinearam a execução desses experimentos, bem como os principais valores que caracterizaram os resultados encontrados.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados nos experimentos 02, 03 e 04.

	Experimento 02	Experimento 03	Experimento 04
Cenário	Borção	Deborção	Borção
Concentração inicial na ST (ppm)	0	1000	0
Concentração no tanque externo (ppm)	1000	0	1500
Volume na ST (l)	40,5	40,5	73,6

Vazão volumétrica (l/h)	10,4	8,4	14,0
Duração do experimento (min)	180	180	300
Desvio percentual entre os valores teóricos e os valores encontrados no experimento (%)	10	5	13

5. CONCLUSÃO

O projeto referente à montagem experimental planejado para fornecer dados relevantes sobre os fenômenos de homogeneização de Boro no pressurizador de um reator modular compacto foi consolidado. Assim, no presente, o Centro Regional de Ciência Nucleares do Nordeste (CRCN/NE) dispõe de um espaço físico devidamente equipado com instrumentos de medida próprios para a realização de experimentos e pesquisas científicas para a análise de dispersão de Boro em escala reduzida. Com o procedimento de montagem experimental, devidamente realizado, foram feitos testes de operação que indicaram a necessidade de ajustes funcionais na montagem. As modificações permitiram que o fluido em estudo percorresse o caminho desejado, sendo direcionado à seção de teste nos orifícios de surto destinados à entrada do fluido.

Verificou-se que a água disponível na instalação (água apenas filtrada) não era viável para a análise proposta, ou seja, para a medida da condutividade elétrica da solução. Com isso, para a realização de todos os experimentos executados foi necessário acumular água destilada suficiente para cada procedimento.

Nos testes realizados para determinar a condutividade elétrica da solução de água destilada com Ácido Bórico com um condutivímetro de bancada não foram promissores. A classificação desse ácido como um ácido fraco indica que ele apresenta baixo grau de ionização, ou seja, menor quantidade de íons dissolvidos na solução aquosa e, conseqüentemente, baixa condutividade elétrica. Para a faixa em estudo (de 0 a 2500 ppm) foi observado que não há linearidade entre a concentração e a condutividade elétrica da solução. Uma alternativa foi utilizar o Cloreto de Sódio (NaCl) como solução traço. Foi determinada uma curva de calibração para relacionar a condutividade elétrica de uma solução de água destilada com NaCl com a concentração de NaCl. A dependência encontrada foi linear o que permitiu quantificar a concentração de NaCl no decorrer dos experimentos, identificando qual a concentração que estava entrando na seção de teste e a concentração que estava saindo.

Foram realizados 4 experimentos na montagem experimental, todos à temperatura ambiente e utilizando apenas uma entrada e uma saída da seção de teste. No experimento 01, buscou-se avaliar a potencialidade da montagem experimental para a determinação da concentração do elemento traço. Para isso, no tanque de diluição, foi inserida uma quantidade de NaCl suficiente para homogeneizar toda a água do circuito a uma concentração de 1000 ppm. De acordo com as medidas obtidas durante esse experimento, observou-se que na entrada da

seção a concentração inicialmente teria valores mais elevados e posteriormente seria estabilizada. Esse resultado consolidou a técnica aplicada para a medida da concentração.

Para o experimento 02, o tanque de diluição dispunha de uma solução com concentração conhecida. O objetivo foi estabelecer um fluxo constante na entrada e saída na seção de teste apenas com água destilada e acionar a entrada da solução com concentração de 1000 ppm. Esse experimento representou um cenário de boração e foi possível identificar e quantificar a quantidade de NaCl na saída da seção de teste. Ao comparar os resultados determinados experimentalmente com os valores teóricos, o desvio percentual entre as medidas foi de 10 %.

No experimento 03, foi representado um cenário de deboração. Nessa situação, a seção de teste foi alimentada com uma vazão volumétrica constante de uma solução com concentração equivalente a 1000 ppm. Concomitantemente, fazia-se sair da seção uma vazão volumétrica constante. Ao atingir esse equilíbrio, a alimentação com a solução com concentração de 1000 ppm foi substituída por apenas água destilada. O sistema de detecção, ou seja, a medida da condutividade, mais uma vez atendeu a proposta em estudo. Foi possível identificar a concentração que chegava à seção e a concentração que saía da seção. O desvio percentual entre os valores experimentais e o teórico para esse experimento foi menor que 5 %.

No experimento 04, foi realizado um cenário de boração, mas agora a seção de teste operou com um volume de água correspondente à 80 % de sua capacidade máxima. Esse experimento foi realizado com o objetivo de comparar se o comportamento determinado era análogo aos casos investigados. O desvio percentual determinado nesse experimento foi de, aproximadamente, 13 %.

Após a execução da montagem experimental, o teste de operação e realização dos experimentos, foi possível comprovar a viabilidade de empregar a instalação experimental, de maneira confiável, para obter valores que configurem um cenário de boração e de deboração em um pressurizador de um reator modular compacto. A consolidação do projeto de uma montagem experimental em escala reduzida para o estudo dos processos de homogeneização de Boro em um pressurizador de um iPWR é uma contribuição que proporcionará a comunidade acadêmica um espaço ímpar para adquirir conhecimento sobre os fenômenos envolvidos.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a implantação de um sistema de detecção da condutividade elétrica dentro da seção de teste, permitindo analisar o fenômeno de homogeneização no pressurizador. Além disso, é necessário ajustar o circuito de modo que a inserção de Boro seja uniforme nas duas entradas e nas duas saídas da seção de teste. Visto que, o fenômeno de diluição de Boro em uma geometria complexa como a de um pressurizador de

um iPWR ainda é um assunto que necessita de estudos mais detalhados para se responder com firmeza ao questionamento da segurança destas unidades de geração.

REFERÊNCIAS

ABDAN, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA O DESENVOLVIMENTO DE ATIVIDADES NUCLEARES. **Definição do Programa Nuclear Brasileiro Uma Necessidade para o Desenvolvimento do País**. 2014. Disponível em: <http://www.aben.com.br/Arquivos/291/291.pdf>. Acesso em: 04/12/2015.

ARIAS, F. J. Boron dilution effect on boiling heat transfer with special reference to nuclear reactors technology. **Annals of Nuclear Energy**. v. 36, p. 1382-1385, 2009.

BARROSO, A. C. O.; BAPTISTA, B. D.; ARONE, F. D.; MACEDO, L. A.; SAMPAIO, P. A. B.; MORAES, M. **IRIS pressurizer design**. In: Proceedings of the International Congress in Advanced Nuclear Power Plants ICAPP 03, Cordoba, Spain, 4-7 Maio, 2003.

BEZERRA, J. L. **Estudo do processo de homogeneização do boro em uma bancada experimental de baixa pressão simulando o pressurizador do reator IRIS**. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares na área de Engenharia de Reatores). Departamento de Energia Nuclear – Universidade Federal de Pernambuco – UFPE – 2012.

BEZERRA, J. L.; LIRA, C. A. B. O; BARROSO, A. C. O.; LIMA, F. R. A. L; SILVA, M. A. B. Study of the boron homogenizing process employing an experimental low-pressure bench simulating the IRIS reactor pressurizer – Part I. **Annals of Nuclear Energy**. v. 53, p. 254–258, 2013a.

BEZERRA, J. L.; LIRA, C. A. B. O; BARROSO, A. C. O.; LIMA, F. R. A. L; SILVA, M. A. B. Study of the boron homogenizing process employing an experimental low-pressure bench simulating the IRIS reactor pressurizer – Part II. **Annals of Nuclear Energy**. v. 62, p. 558–563, 2013b.

BOTELHO, D. A.; SAMPAIO, P. A. B.; LAPA, C. M. F.; PEREIRA, C. M. N. A.; MOREIRA, M. L.; BARROSO, A. C. O. Optimization procedure to design pressurizer experiments. In INAC 2005. Santos, Brasil, 2005.

BOTELHO, D. A.; SAMPAIO, P. A. B.; LAPA, C. M. F.; PEREIRA, C. M. N. A.; MOREIRA, M. L.; BARROSO, A. C. O. The IRIS pressurizer: simulation of out-surge transients and optimization procedure to design scaled experiments. **Progress in Nuclear Energy**. v. 50, p. 730-739, 2008.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Matriz Energética Nacional**. Colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007.

CARELLI, M. D. IRIS: A global approach to nuclear power renaissance. **Nuclear News**, v. 46, n. 10, p. 32-42, 2003.

CARELLI, M. D.; CONWAY, L. E.; ORIANI, L.; PETROVIC, B.; LOMBARDI, C. V.; RICOTTI, M. E.; BARROSO, A. C. O.; COLLADO, J. M.; CINOTTI, L.; TODREAS, N. E.; GRGIC, D.; MORAES, M. M.; BOROUGHS, R. D.; NINOKATA, H.; INGERSOLL, D. T.; ORIOLO, F. The design and safety features of the IRIS reactor. **Nuclear Engineering and Design**. v. 230, p. 151-167, 2004.

CARELLI, M. D.; PETROVIC, B.; CAVLINA, N.; GRGIC, D. **IRIS (International Reactor Innovative and Secure) – design overview and deployment prospects**. In: International Conference Nuclear Energy for New Europe 2005, Blend, Slovenia, 5-8 Setembro, 2005.

CARELLI, M. D.; INGERSOLL, D. T. **Handbook of Small Modular Nuclear Reactor**. Woodhead Publishing Ltd. p. 536, 2015.

CHENG, Y. H.; WANG, J. R.; LIN, H. T.; SHIH, C. Benchmark calculations of pressurizer model for Maanshan nuclear power plant using TRACE code. **Nuclear Engineering and Design**. v. 239, p. 2343-2348, 2009.

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**. v. 238. p. 577-589, 2008.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2015: Ano base 2014** Rio de Janeiro: EPE, 2015.

EUROPEAN NUCLEAR SOCIETY. Nuclear power plants, world-wide. ENS, 2015. Disponível em: <https://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/nuclear-power-plant-world-wide.htm>. Acesso em: 04/12/2015.

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**. v. 239, p. 749-760, 2009.

GLASER, A.; RAMANA, M. V.; AHMAD, A.; SOCOLOW. Small Modular Reactors: a window on nuclear energy – An energy technology distillate from the Andlinger Center for energy and environment at Princeton University, 2015. Disponível em:

<<http://acee.princeton.edu/distillates/files/2015/06/Andlinger-Nuclear-Distillate.pdf>>. Acesso em: 26/07/2015.

GONZÁLEZ, I.; QUERAL, C.; EXPÓSITO, A. Phenomenology during the loss of residual heat removal system at midloop conditions with pressurizer PORVs open: Associated boron dilution. **Annals of Nuclear Energy**. v. 34, pp. 166-176, 2007.

HERTLEIN, R.; UMMINGER, K.; KLIEM, S.; PRASSER, H. M.; HÖHNE, T.; WEIB, F. P. Experimental and numerical investigation of boron dilution transients in pressurized water reactors. **Nuclear Technology**. v. 141, p. 88-107, 2003.

HÖHNE, T.; KLIEM, S.; ROHDE, U.; WEISS, F.-P. Boron dilution transients during natural circulation flow in PWR - Experiments and CFD simulations. **Nuclear Engineering and Design**. v. 238, p. 1987-1995, 2008.

HYVARINEN, J. The inherent boron dilution mechanism in pressurized water reactors. **Nuclear Engineering and Design**. v. 145, p. 227-240, 1993.

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Nuclear Technology Review 2015: Report by the Director General**, 2015. Disponível em: https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC59/GC59InfDocuments/English/gc59inf-2_en.pdf . Acesso em: 04/12/2015.

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Safety Reports Series Nº 30: Accident Analysis for Nuclear Power Plants with Pressurized Water Reactors**. Vienna, 2003.

KIGER, K.; GAVELLI, F. Boron mixing in complex geometries: flow structures details. **Nuclear Engineering and Design**. v. 208, p. 67-85, 2001.

KIM, S. N.; GRIFFITH, P. PWR pressurizer modeling. **Nuclear Engineering and Design**. v. 102, p. 199-209, 1987.

KLIEM, S.; PRASSER, H. -M.; SÜHNEL, T.; WEISS, F. -P.; HANSEN, A. Experimental determination of the boron concentration distribution in the primary circuit of a PWR after a postulated cold leg small break loss-of-coolant-accident with cold leg safety injection. **Nuclear Engineering and Design**. v. 238, p. 1788-1801, 2008.

KLIEM, S.; ROHDE, U.; WEISS, F. -P. Core response of a PWR to a slug of under-borated water. **Nuclear Engineering and Design**. v. 230. p. 121-132, 2004.

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**. v. 238. p. 566-576, 2008.

LAMARSH, J. R.; BARATTA, A. J. **Introduction to nuclear engineering**. 3 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

LEWIS, E. E. **Fundamentals of Nuclear Reactor Physics**. Academic Press. 1 ed. 2008.

LIVERHANT, S. E. **Elementary introduction to nuclear reactor physics**. New York: John Wiley & Sons, 1960.

LOCATELLI, G.; BINGHAM, C.; MANCINI, M. Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects. **Progress in Nuclear Energy**. v.73, p. 75-85, 2014.

MEINHART, C. D.; WERELEY, S. T.; SANTIAGO, J.G. PIV measurements of a microchannel flow. **Experiments in Fluids**. v. 27, pp. 414-419, 1999.

MURRAY, R. L. **Nuclear energy: an introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes**. 6 ed. United States of America: Butterworth-Heinemann, 2009.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. O que é SIN – Sistema Interligado Nacional, 2015. Disponível em: http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx. Acesso em: 04/12/2015.

PETROVIC, B.; RICOTTI M.; MONTI S.; CAVLINA N.; NINOKATA N. Pioneering role of IRIS in the resurgence of Small Modular Reactors. **Nuclear Technology**. v.178, p. 126-152, 2012.

POPOV, E.; YODER, G. IRIS pressurized fluid dynamics and heat transfer analyses. **Nuclear Engineering and Design**. v. 238, p. 81-89, 2008.

RIENSTRA, S. W.; HIRSHBERG, A. **An introduction to acoustics**. Eindhoven University of Technology, 2012.

SANTOS, W. S. **Avaliação dos aspectos de segurança afetados pela redução da concentração de Boro do Tanque de Injeção de Boro na Usina Nuclear Angra 1**. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ – 1999.

ROSEMOUT ANALYTICAL, Theory and application of conductivity. **Application Data Sheet**. ADS 43-018, rev.D, 2010.

SILVA, M. A. B. **Determinação dos parâmetros de uma seção de testes para o pressurizador do reator nuclear IRIS**. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares na área de Engenharia de Reatores). Departamento de Energia Nuclear – Universidade Federal de Pernambuco – UFPE – 2008.

SILVA, M. A. B.; LIRA, C. A. B. O.; BARROSO, A. C. O. Fractional Scaling Analysis for IRIS pressurizer reduced scale experiments. **Annals of Nuclear Energy journal**. v. 37, p. 1415-1419, 2010.

SILVA, M. A. B.; LIRA, C. A. B. O.; BARROSO, A. C. O. Determination of a test section parameters for IRIS nuclear reactor pressurizer. **Progress in Nuclear Energy**. v. 53, p. 1181-1184, 2011.

SUN, J. G.; SHA, W. T. **Analysis of boron dilution in a four-loop PWR**. Washington: Doc. U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1995.

TESCHENDORFF, V.; UMMINGER, K.; WEISS, F. P. Analytical and experimental research into boron dilution events. **Eurosafe**, 2001. In.:___ <https://www.eurosafe-forum.org/eurosafe2001> acesso em 17/11/2015.

VIM, **Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados**. Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012.

WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LCC. **Final technical progress report – STD-ES-03-40**. Nov. 3, Pittsburb, 2003.

APÊNDICE A – VALORES TEÓRICOS DA CONCENTRAÇÃO

Para os casos em que a inserção de água com uma concentração diferente foi feita de forma contínua (experimentos 02, 03e 04), os valores teóricos da concentração, C' , em função do tempo, t , foram determinados, a partir da equação a seguir:

$$C' = C_E + (C_0 - C_E) \cdot e^{-\alpha t}$$

	Experimento 02	Experimento 03	Experimento 04
C_E (ppm)	1000	0	1500
C_0 (ppm)	0	1000	0
w' (l/h)	10,4	8,4	14
M' (l)	40,5	40,5	73,6
$\alpha = w' / M'$	0,25679	0,207407	0,190217

t (min)	Concentração (ppm)		
0	0	1000	0
10	41,89543	966,0227	46,80845
20	82,03564	933,1999	92,1562
30	120,4941	901,4924	136,0889
40	157,3414	870,8621	178,6506
50	192,645	841,2726	219,8841
60	226,4695	812,6885	259,8309
70	258,8769	785,0756	298,5312
80	289,9265	758,4008	336,0238
90	319,6754	732,6325	372,3464
100	348,1779	707,7396	407,5355
110	375,4862	683,6926	441,6266
120	401,6505	660,4626	474,6538
130	426,7186	638,0219	506,6504
140	450,7365	616,3436	537,6485
150	473,7481	595,402	567,6792
160	495,7957	575,1718	596,7729
180	537,1584	536,7503	652,2649
210	592,9281	483,8763	729,1764
240	641,9779	436,2108	799,1101
270	685,1174	393,2407	862,699
300	723,059	354,5035	920,5187
330	756,4287	319,5822	973,0926
360	785,7776	288,1009	1020,897