

JOSÉ EDUARDO PEREIRA DA ROSA

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA HOMOGENEIZAÇÃO DO ÁCIDO BÓRICO EM
UM PRESSURIZADOR DE UM REATOR NUCLEAR AVANÇADO

Dissertação submetida ao programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear – Ênfase Acadêmica em Engenharia de Reatores.

Orientadora: Prof.^a Maria de Lourdes Moreira (PPGIEN/CNEN)

Rio de Janeiro

2013

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA HOMOGENEIZAÇÃO DO ÁCIDO BÓRICO EM
UM PRESSURIZADOR DE UM REATOR NUCLEAR AVANÇADO

José Eduardo Pereira da Rosa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA NUCLEAR – ÊNFASE ACADÊMICO EM ENGENHARIA DE
REATORES

Aprovada por:

Prof.^a Maria de Lourdes Moreira, D. Sc.

Prof. Paulo Augusto Berquó de Sampaio, Ph.D.

Prof. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, D. Sc.

Prof. Jair de Lima Bezerra, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2013

Dedico esta dissertação à minha esposa,
Suelen Pestana Cardoso, que sempre me
incentivou a prosseguir em meus estudos.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me proporcionado saúde e força para conseguir vencer as adversidades impostas pela vida.

A minha esposa, que mesmo percebendo muitas vezes a minha vontade de deixar as dificuldades da vida vencer me deu força para que este projeto fosse concluído.

Aos familiares que muitas vezes me perguntaram como andava o meu mestrado e se orgulhavam da minha caminhada, isto sempre me deu força para seguir em frente e continuar.

Aos professores do programa que contribuíram de forma significativa para minha formação e conhecimento na área nuclear. Um especial agradecimento a professora Maria de Lourdes Moreira por ter me ajudado no desenvolvimento do projeto e ter contribuído de forma positiva nos momentos de dificuldades.

Aos alunos do IEN, que mesmo sem perceber me deram força para não desistir nos momentos difíceis. Um agradecimento especial ao aluno André Felipe, que muitas vezes gastou seu tempo vindo até ao IEN colaborar com dúvidas que eu tinha, acredito que sem sua ajuda este projeto não teria chegado ao fim.

Ao pesquisador Jair de Lima Bezerra pelo apoio e incentivo para realizar este trabalho.

Aos funcionários da secretaria Joana, Janaína e Dona Cláudia, que sempre me ajudaram quando precisei, mostrando-se sempre dispostas a resolver algum problema.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGIEN/CNEN como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA HOMOGENEIZAÇÃO DO ÁCIDO BÓRICO EM UM PRESSURIZADOR DE UM REATOR NUCLEAR AVANÇADO

José Eduardo Pereira da Rosa

Março de 2013

Orientadora: Prof.^a Maria de Lourdes Moreira (PPGIEN/CNEN)

Programa: Ciência e Tecnologia Nucleares – IEN/CNEN

A reatividade de um reator refrigerado a água é controlada utilizando-se barras de controle ou diluição de boro na água do refrigerante do circuito primário. O boro ^{10}B é considerado um absorvedor de nêutrons eficiente, principalmente quando utilizado na absorção de nêutrons térmicos. Estudos transitórios com deficiência na homogeneização de boro em reatores PWR tornam-se importante, pois a solução de ácido bórico é adicionada ao refrigerante do circuito primário auxiliando no controle das taxas de fissão no núcleo do reator. Após desligamento do reator, o boro presente no refrigerante tem a função de manter o reator no estado de subcriticalidade. Caso haja a introdução de água borada com baixa concentração no circuito primário, torna-se necessário fazer um aumento da concentração desta solução e assegurar que o refrigerante esteja bem homogeneizado, evitando que água com pouca quantidade de boro atinja o núcleo. O objetivo deste trabalho é simular a homogeneização do boro no pressurizador de um reator nuclear avançado. É utilizada uma seção de testes, que representa $\frac{1}{4}$ de um pressurizador de um reator nuclear modular. Através da utilização do código CFX, programa computacional que permite análises termohidráulica de diferentes tipos de escoamento, foram simulados três exemplos em diferentes condições de operação. A partir destes resultados foram analisados parâmetros que podem influenciar nesta homogeneização. Estudos de casos como variação das

dimensões da tubulação de entrada e saída, variação da vazão e mudança de posicionamento das entradas e saídas, foram feitos com o objetivo de encontrar parâmetros que podem auxiliar na otimização da homogeneização do boro. Os resultados encontrados mostram que os fatores analisados podem ser alterados no projeto a fim de se obter melhores condições de operação.

Palavras-chave: Controle de reatividade. Homogeneização de boro. Reator nuclear. Pressurizador. Dinâmica de fluido computacional.

Abstract of dissertation submitted to PPGIEN/CNEN as part of the necessary requirements for obtaining of Master's degree Science (M. Sc.)

COMPUTER SIMULATION OF HOMOGENIZATION OF BORIC ACID IN A PRESSURIZER AND ADVANCED NUCLEAR REACTOR

Jose Eduardo Pereira da Rosa

March / 2013

Advisors: Prof.^a Maria de Lourdes Moreira (PPGIEN/CNEN)

Program: Ciência e Tecnologia Nucleares – IEN/CNEN

The reactivity of a water cooled reactor is controlled using control rods or boron dilution in water of the primary circuit. The boron-10 (^{10}B) is an efficient neutron absorber, especially when used in the absorption of thermal neutrons. Transient studies with disabilities in the homogenization of boron in PWR reactors become important as the boric acid solution is added to the primary circuit coolant in order to help control the rate of fission in the reactor core. After the reactor shutdown, the boron present in the coolant has the function of maintaining reactor subcriticality. If low concentrated boron solution enters in the primary circuit, it becomes necessary to inject boron and to assure that the coolant will be well homogenized in order to increase the concentration and thus preventing water with small amounts of boron to reach the core. The aim of this study is to simulate the boron homogenization in the pressurizer of an advanced nuclear reactor. It is used a test section, which represents a quarter of a modular nuclear reactor pressurizer. By using the CFX code, a computer program that allows thermal hydraulic analysis of different types of flow, three examples were simulated using different operating conditions. With the results, it was analyzed the parameters that could influence this homogenization. Case studies such as variation of the dimensions of the water inlet and outlet tubes, flow variation and change in positioning of entrances and exits were made with the goal of finding parameters that could help the optimization of

the homogenization of boron. The results confirm that the issues analyzed can be changed in the project in order to obtain the best operating condition.

Keywords: Control of reactivity, Boron homogenization, Finite volume method, Pressurizer, Computational fluid dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vista seccional de um núcleo PWR convencional.....	24
Figura 2: Pressurizador de um reator PWR.....	26
Figura 3: Vaso de pressão do reator IRIS	30
Figura 4: Contenção do IRIS	31
Figura 5: Corte transversal do pressurizador do reator IRIS	32
Figura 6: Definição de volume de controle	40
Figura 7: Elemento de malha	42
Figura 8: Representação da região de interesse na simulação.....	44
Figura 9: Geometria do experimento A	47
Figura 10: Geometria do experimento B	47
Figura 11: Geometria do experimento C	48
Figura 12: Malha do experimento A	49
Figura 13: Malha do experimento B	49
Figura 14: Malha do experimento C	49
Figura 15: Gráfico comparativo do experimento “A”	52
Figura 16: Gráfico comparativo do experimento “B”	54
Figura 17: Comparação do experimento “C”	55
Figura 18: Gráfico da concentração normalizada x tempo	57
Figura 19: Gráfico da concentração normalizada x tempo	59
Figura 20: Gráfico da concentração normalizada x tempo	60
Figura 21: Gráfico da concentração de ácido bórico para $D= 1,5$ cm.....	63
Figura 22: Gráfico da concentração para $D= 2,5$ cm.....	64
Figura 23: Gráfico da concentração para entrada deslocada.....	65
Figura 24: Gráfico de concentração para saída deslocada	67

Figura 25: Gráfico para entrada e saída deslocadas.....	68
Figura 26: Comportamento da concentração para vazão de 30 L/h.....	70
Figura 27: Comportamento da concentração para vazão de 60 L/h.....	71
Figura 28: Gráfico do experimento C com $D = 1,5$ cm.	74
Figura 29: Gráfico do experimento C com $D = 2,5$ cm	75
Figura 30: Gráfico da concentração x tempo para vazão de 30 L/h.	77
Figura 31: Gráfico da concentração x tempo para vazão de 60 L/h.	78
Figura 32: Fluxograma da bancada experimental	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Elementos da malha de cada experimento	50
Tabela 2: Valores da concentração média em ppm em intervalos de 1 hora.	53
Tabela 3: Valores da concentração média em PPM em intervalos de 1 hora.	54
Tabela 4: Valores da concentração média em PPM em intervalos de 1 hora.	56
Tabela 5: Dados experimentais do experimento A.....	58
Tabela 6: Dados experimentais do experimento B.....	59
Tabela 7: Dados experimentais do experimento C.....	61
Tabela 8: Valores da concentração média para $D = 1,5$ cm.....	63
Tabela 9: Valores da concentração média para $D = 2,5$ cm.....	65
Tabela 10: Valores da concentração média para entrada deslocada.....	66
Tabela 11: Valores da concentração média para saída deslocada.	67
Tabela 12: Valores da concentração média para entrada e saída deslocadas.	69
Tabela 13: Valores médios da concentração em ppm a cada hora.....	70
Tabela 14: Valores médios da concentração em ppm a cada hora.....	72
Tabela 15: Valores médios da concentração para $D=1,5$ cm.	74
Tabela 16: Valores médios da concentração para $D=2,5$ cm.	76
Tabela 17: Valores médios da concentração a cada meia hora.....	77
Tabela 18: Valores médios da concentração a cada meia hora.....	79
Tabela 19: Dados experimentais.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	–	Dinâmica de Fluido Computacional (Computational Fluid Dynamics)
GV	–	Gerador de Vapor
IRIS	–	International Reactor Innovative and Secure
LOCA	–	Loss of Coolant Accident
MVF	–	Método de Volumes Finitos
PWR	–	<i>Pressurized Water Reactor</i>
SSR	–	Sistema de Refrigeração do Reator.

LISTA DE SÍMBOLOS

C_1	–	Concentração na seção de testes
C_2	–	Concentração no tanque de boração
D_ϕ	–	Difusividade cinemática
h	–	Entalpia
h_{tot}	–	Entalpia total específica
\dot{m}	–	Vazão mássica
\dot{m}_{ip}	–	Vazão mássica
n_j	–	vetor normal
p	–	Pressão
Q	–	Vazão de entrada e saída na seção de testes
S_E	–	Termo fonte de energia
S_M	–	Termo fonte de momento
S_ϕ	–	Termo fonte da variável adicional
t	–	Tempo
U^0	–	Velocidade do fluido no tempo anterior
U	–	Velocidade do fluido

U_i	–	Velocidade na direção i
U_j	–	Velocidade na direção j
V	–	Volume
V_1	–	Volume na seção de testes
V_2	–	Volume no tanque de boração
T	–	Temperatura
Γ_{eff}	–	difusividade efetiva
λ	–	Condutividade térmica
μ_{eff}	–	Viscosidade efetiva
ρ^0	–	Densidade do fluido no tempo anterior
ρ	–	Densidade do fluido
τ	–	Tensor de tensões
ϕ	–	Variável adicional (Concentração média de boro)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	REATORES DE GERAÇÃO IV	18
1.1.1	<i>Energia nuclear sustentável</i>	19
1.1.2	<i>Energia nuclear competitiva</i>	19
1.1.3	<i>Sistema Seguro e Confiável</i>	20
1.1.4	<i>Resistência à proliferação e proteção física</i>	20
1.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVO	20
1.3	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	22
2	REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1	REATORES DE ÁGUA PRESSURIZADA	23
2.2	CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PRESSURIZADORES	25
2.3	REATOR IRIS	27
2.3.1	<i>Pressurizador do reator ÍRIS</i>	32
2.4	HOMOGENEIZAÇÃO DO BORO	33
3	DINÂMICA DE FLUIDO COMPUTACIONAL	36
3.1	COMO TRABALHA UM CÓDIGO CFD	37
3.2	EQUAÇÕES DO MODELO	38
3.3	MÉTODO DE VOLUMES FINITOS	40
4	METODOLOGIA	44
5	MODELAGEM COMPUTACIONAL	47
5.1	MODELAGEM GEOMÉTRICA	47
5.2	GERAÇÃO DE MALHA	48
5.3	CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO	50
5.4	PROCESSAMENTO	51
6	VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO	52
6.1	EXPERIMENTO “A”	52
6.2	EXPERIMENTO “B”	53
6.3	EXPERIMENTO “C”	55
7	COMPARAÇÃO QUALITATIVA DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS	57
7.1	EXPERIMENTO “A”	57
7.2	EXPERIMENTO “B”	58
7.3	EXPERIMENTO “C”	60
8	ESTUDOS DE CASOS A PARTIR DA VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO	62
8.1	ALTERAÇÕES PARA O EXPERIMENTO “A”	62
8.1.1	<i>Diâmetro de 1,5 cm</i>	62
8.1.2	<i>Diâmetro 2,5 cm</i>	64
8.1.3	<i>Deslocamento da entrada</i>	65
8.1.4	<i>Deslocamento da saída</i>	66

8.1.5	<i>Deslocamento da entrada e saída</i>	68
8.1.6	<i>Alteração da vazão para 30 L/h</i>	69
8.1.7	<i>Alteração da vazão para 60 L/h</i>	71
8.2	ALTERAÇÕES PARA O EXPERIMENTO “C”	73
8.2.1	<i>Diâmetro de 1,5 cm</i>	73
8.2.2	<i>Diâmetro de 2,5 cm</i>	75
8.2.3	<i>Alteração da vazão para 30 L/h</i>	76
8.2.4	<i>Alteração da vazão para 60 L/h</i>	78
9	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1 INTRODUÇÃO

Em meados do século XX surgiram as primeiras possibilidades de se criar reatores nucleares com o objetivo de gerar energia elétrica para fins comerciais. Esses reatores utilizavam água leve servindo de refletor, refrigerante e moderador. O conhecimento das propriedades termodinâmicas da água, aliado a sua disponibilidade a baixo custo e a sua capacidade de moderar nêutrons, estimularam o seu uso nesses reatores nucleares incipientes.

O pressurizador é um componente de grande importância em reatores do tipo PWR (*pressurized water reactor*), sendo o responsável pelo controle da pressão do sistema de refrigeração, mantendo o núcleo do reator sempre sub-resfriado, prevenindo que o combustível nuclear sofra qualquer prejuízo. Outra importante função do pressurizador é a monitoração da quantidade de refrigerante no núcleo do reator (BARROSO et. al., 2004).

Lideradas pela Westinghouse, cerca de vinte organizações de um total de dez países, formaram um consórcio com o propósito de desenvolver um reator do tipo PWR integral, modular e de média potência, conhecido como IRIS (*International Reactor Innovative and Secure*), que possui a maior parte de seus componentes no interior do vaso de pressão. Ainda em fase de desenvolvimento, o reator IRIS está projetado para eliminar, ou ao menos minimizar as chances de ocorrência de acidentes, sendo essa capacidade conferida pela filosofia de projeto *safety-by-design* (CARELLI et. al., 2004).

Sendo considerado um reator com características intermediárias das gerações III e IV, o reator IRIS tem como propósito o atendimento dos seguintes requisitos:

- Aumento da segurança;
- Resistência à proliferação nuclear;

- Diminuição de custos na geração de energia elétrica;
- Redução de lixo nuclear.

O projeto de um reator integral contribui para a eliminação de acidentes, o que não ocorre em reatores tipo PWR, por exemplo. Uma das características mais importantes do reator IRIS é o seu conceito quanto a sua abordagem de segurança, que é o conceito (*Safety by Design*), que tira o máximo de proveito da configuração do sistema de refrigeração de um reator integral para eliminar a possibilidade de alguns acidentes, e também, diminuir a consequência de outros (BARROSO et al., 2003). A ocorrência do acidente de perda de refrigerante (*Loss of coolant accidents - LOCA*) é praticamente eliminada, uma vez que, nesses tipos de reatores, não há longos sistemas de tubulação (WESTINGHOUSE, 2003b).

Uma das aplicações a que se propõe o IRIS está relacionada ao desenvolvimento sustentável de regiões carentes de fontes de energia e de água doce. Por meio de análises preliminares de aspectos socioeconômicos e ambientais, mostrou-se que a dessalinização e a geração de energia para o Polígono das Secas brasileiro podem ser economicamente viáveis com o uso da energia nuclear nos próximos anos (BAPTISTA FILHO et al., 2005).

1.1 REATORES DE GERAÇÃO IV

O reator IRIS ainda não pode ser considerado um reator de quarta geração, mas como possui requisitos para se tornar um reator inovador, será feita um breve comentário das características desses reatores baseando-se em um roteiro que foi escrito no encontro realizado em dezembro de 2002, definindo metas da área nuclear que a torna mais competitiva no mercado. Desafiadoras metas de tecnologia para os sistemas nucleares de energia são definidas em quatro áreas: sustentabilidade, economia, segurança e confiabilidade e resistência à proliferação e proteção física.

Esses novos sistemas nucleares podem atingir um número de benefícios em longo prazo que ajudará a energia nuclear a desempenhar um papel essencial no mundo.

1.1.1 Energia nuclear sustentável

Sustentabilidade é a capacidade de atender as necessidades da presente geração, sem comprometer o futuro das próximas gerações. Metas de sustentabilidade são definidas com foco na gestão de resíduos e de recursos utilizados. Outros fatores que são comumente associadas à sustentabilidade, tais como economia e meio ambiente, são considerados separadamente para destacar a sua importância. Os benefícios de metas de sustentabilidade incluem:

- Estender o fornecimento de combustível nuclear em séculos futuros através da reciclagem do combustível usado para recuperar seu conteúdo energético.
- Redução substancial na quantidade de resíduos e seu calor de decaimento.

1.1.2 Energia nuclear competitiva

Objetivos econômicos amplos considerando custos competitivos e riscos financeiros de sistemas de energia nuclear. Projetando-se a frente das metas de economia incluem:

- Aprimorar os custos da produção de energia, através de uma série de avanços inovadores na planta, ciclo de combustível mais eficiente, simplificações de projetos e tamanho das plantas.
- Reduzir o risco econômico para projetos nucleares através do desenvolvimento de plantas construídas, usando fabricações e técnicas de construções inovadoras, e possivelmente projetos modulares.

- Permitir a produção de hidrogênio e outros produtos energéticos no local onde há necessidade.

1.1.3 Sistema Seguro e Confiável

Manter a operação segura e confiável é uma prioridade essencial no desenvolvimento de sistemas da próxima geração. Segurança e metas de confiabilidade, em termos gerais, considerando uma operação segura e confiável, melhorar a gestão de acidentes e minimizar as consequências. Os benefícios incluem:

- Aumentar a utilização de recursos de segurança inerentes e características de segurança transparentes, que possam ser compreendidos por não especialistas.
- Reforçar a confiança do público na segurança da energia nuclear.

1.1.4 Resistência à proliferação e proteção física

Considerar meios para controlar e proteger materiais nucleares e suas instalações. Os benefícios do cumprimento desses objetivos incluem: aumentar a eficácia contra a proliferação, aumentar a resistência dos sistemas nucleares através de novos projetos e aumentar a proteção física contra o terrorismo, melhorando a robustez das novas instalações.

1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVO

O boro 10 (^{10}B) é considerado um absorvedor de nêutrons eficiente, principalmente quando utilizado na absorção de nêutrons térmicos. Quando diluído no refrigerante de reatores PWR sob a forma de Ácido Bórico, auxilia no controle do excesso de reatividade do núcleo do reator. A questão da homogeneização é um fator

de grande importância para a segurança na operação de um reator em função de manobras inadequadas na homogeneização do boro.

Se um dado volume de água com baixa concentração de boro é bombeado para o núcleo e esta concentração for inferior à concentração do primário, pode-se acarretar um aumento indesejável na potência do reator. O inverso acontece caso a água bombeada para o núcleo possua uma concentração maior que a do circuito primário. Manobras inadequadas na homogeneização do boro podem afetar a potência do reator, causando problemas para a operação.

Foi construída uma bancada experimental simplificada com seção testes em acrílico, que permitiu ao pesquisador Jair Bezerra, em sua tese de doutorado (BEZERRA, 2012), realizar experimentos para estudar como se processa a mistura e a homogeneização do volume de líquido no pressurizador em função dos mecanismos de circulação no sistema primário.

Estes experimentos foram analisados baseando-se no modelo matemático de conservação da massa do sistema, descrito no apêndice A. A partir desses resultados foi feita uma comparação com resultados da equação matemática do modelo sem levar em consideração a geometria do problema e foi feita uma comparação entre os resultados obtidos. Como sugestão do próprio pesquisador para realização de trabalhos futuros, foi considerada a possibilidade de realizar simulações utilizando o CFX-ferramenta que será apresentada com mais detalhes posteriormente. Dessa forma, os objetivos do presente trabalho são:

- Estudar os processos de homogeneização do Ácido Bórico na seção de testes da bancada experimental de baixa pressão simulando 1/4 pressurizador do reator IRIS, realizados pelo pesquisador Jair Bezerra, utilizando o CFX;
- Fazer uma comparação entre os resultados obtidos pelo modelo teórico utilizado como base com a solução do problema utilizando as técnicas de CFD

solucionando as equações de Navier-Stokes para o mesmo escoamento do experimento.

- Após a etapa de validação e comparações, realizar estudos de casos que possam auxiliar no melhor desempenho do projeto em relação à homogeneização do reator, com objetivo de obter a melhor configuração de operação.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A realização de testes com estruturas em tamanho real envolve custos bastante elevados, tornando muitas vezes inviável tal realização. Assim, a utilização de modelos sujeitos a cargas e dimensões diferentes do protótipo se tornou uma opção eficiente na elaboração de problemas estruturais.

Modelos experimentais construídos e usados apropriadamente reduzem a probabilidade de se cometerem erros na construção do protótipo. A vantagem da utilização de modelos ocorre, também, nos casos em que a expressão analítica envolvendo as variáveis em questão não é conhecida.

Como o reator IRIS apresenta uma configuração diferente dos reatores PWR convencionais, a realização de testes experimentais ganham importância no mundo científico, pois são através destes experimentos que poderão ser feitas previsões de problemas que poderão aparecer com esta nova configuração de reator PWR. Assim, fazer testes utilizando códigos comerciais para verificação de dados experimentais também se torna importante do ponto de vista prático, pois garante maior precisão em sua montagem, não apresentando custos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 REATORES DE ÁGUA PRESSURIZADA

O reator PWR utiliza a água leve como refrigerante, moderador e refletor. A característica principal de uma unidade do tipo PWR é a água de refrigeração pressurizada (circuito primário), mantendo sempre sua fase líquida, uma vez que a pressão é mantida a aproximadamente 15 Mpa (LAMARSH, BARATTA, 2001). O Sistema de Refrigeração do Reator PWR (SRR) é, praticamente, todo contido no interior do envoltório de contenção e é composto de dois circuitos, como no caso do reator de Angra-1 (ELETRONUCLEAR, 1999-a), que contém uma perna fria, uma perna quente, um gerador de vapor (GV) e uma bomba de refrigeração do reator (BRR). Um dos circuitos tem, ainda, o pressurizador ligado a ele através de uma linha de surto. O pressurizador, por sua vez, é ligado ao tanque de alívio através das linhas de descarga das suas válvulas de alívio e de segurança.

Nesse tipo de reator, cujo núcleo é exibido pela Figura 1, o combustível geralmente utilizado em reatores PWR é o dióxido de urânio (UO_2) levemente enriquecido (de 2 a 5 % em massa).

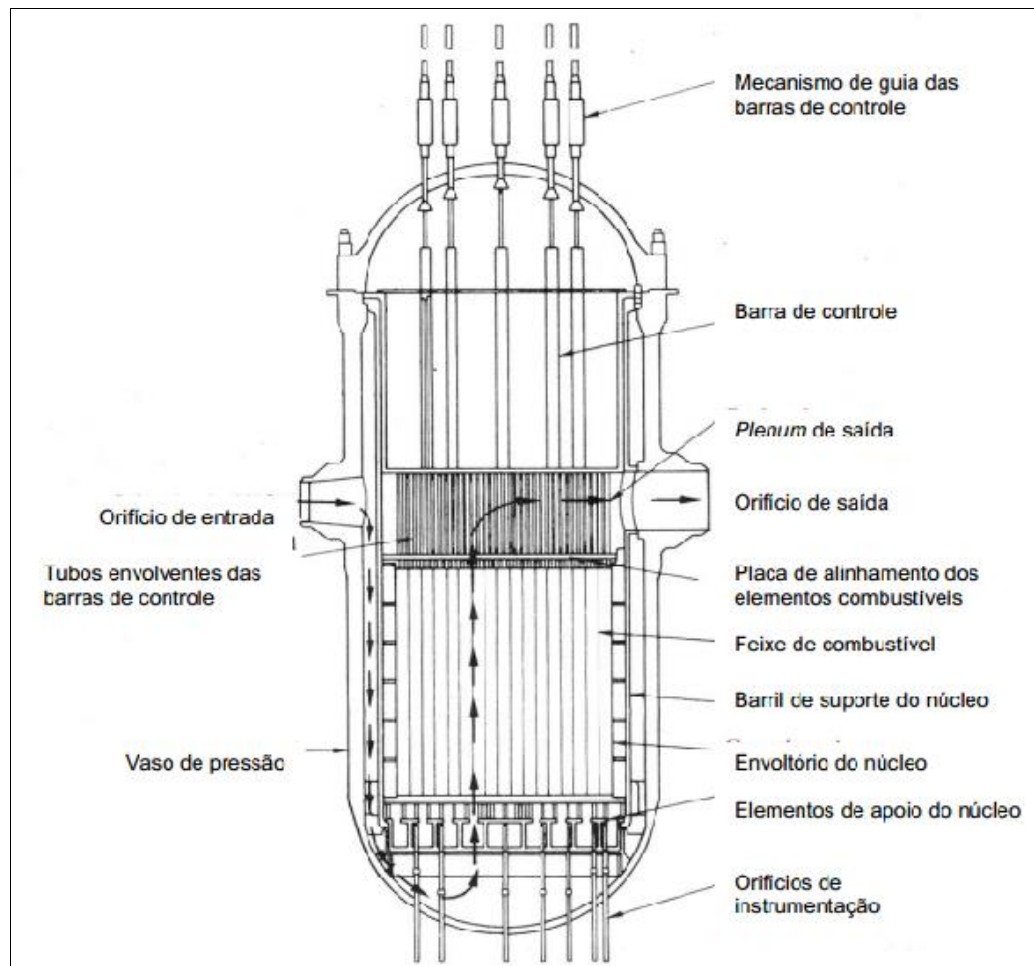


Figura 1: Vista seccional de um núcleo PWR convencional

Em reatores PWR, o feixe de combustível consiste em um arranjo de formato quadrangular contendo desde 15x15 até 19x19 canais, os quais são destinados a receber as barras de combustível ou de controle. Nesse esquema, há cerca de 20 tubos-guia servindo como estrutura de suporte, e grades espaçadoras estão dispostas a fim de que se mantenha uma separação entre as barras de combustível.

Os geradores de vapor estão acima do núcleo, enquanto o vaso de pressão está na região central inferior. Tal disposição facilita a circulação do refrigerante por convecção natural em casos de perda de circulação forçada.

2.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PRESSURIZADORES

Em reatores PWR, o volume e a pressão do refrigerante podem sofrer oscilação devido a variações na temperatura. Tais variações podem ocorrer tanto em operação normal quanto em situações transitórias. A fim de se manter a pressão numa faixa de tolerância, tais sistemas são dotados de um dispositivo chamado pressurizador.

O pressurizador é um componente de grande importância para os reatores do tipo PWR, já que é responsável pelo controle da pressão do sistema de refrigeração, mantendo um nível de sub-resfriamento no núcleo e, conseqüentemente, previne que o combustível do núcleo venha a sofrer danos durante a operação da usina. Outra função do pressurizador é permitir a monitoração da quantidade de refrigerante no reator (BARROSO et al., 2004), embora haja situações em que tal função não é adequada, devendo o nível do refrigerante ser obtido diretamente (WENRAN et al., 1998).

Os pressurizadores são dotados de aspersores, aquecedores elétricos e válvulas de alívio e de segurança. Há uma linha de surtos que conecta uma das pernas quentes do circuito primário à base do pressurizador, enquanto no topo deste se encontra a linha do aspersor, a qual está ligada a, pelo menos, uma das pernas frias. Na Figura 2 são mostrados os detalhes de um pressurizador convencional.

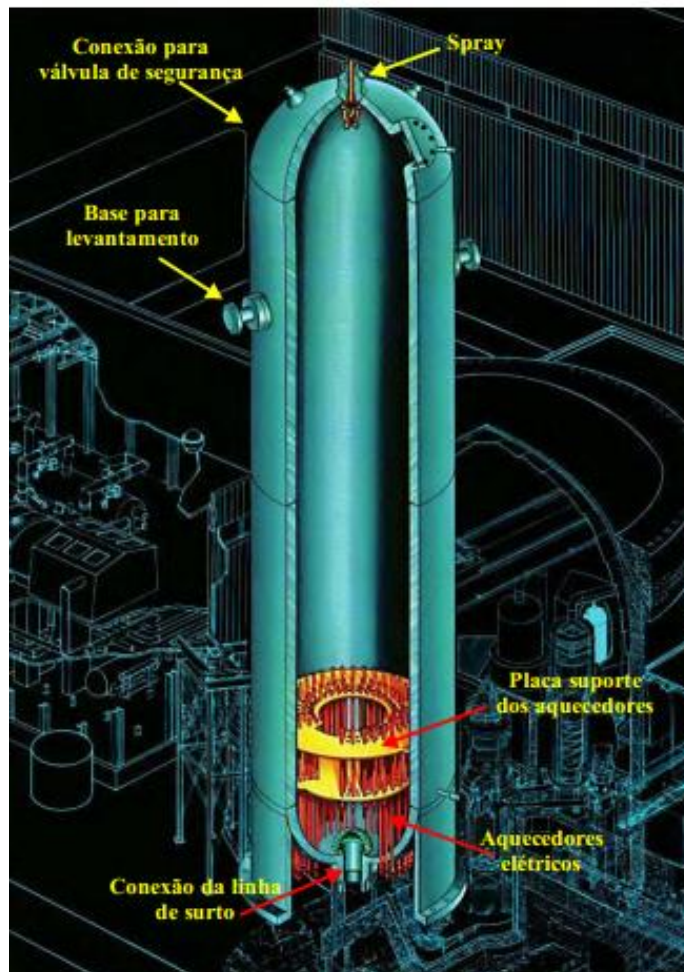


Figura 2: Pressurizador de um reator PWR

Nas situações transitórias ocasionadas por eventos de aquecimento do circuito primário, tais como queda de potência das turbinas, o excesso de água, proveniente da expansão, dirige-se ao pressurizador (insurge), provocando um aumento na pressão. Acionam-se, então, os aspersores, que reduzem a pressão através da condensação do vapor. Nos casos em que a atuação do aspersor não é suficiente, são acionadas as válvulas de alívio e, se necessárias, as de segurança.

O desenvolvimento de uma análise sobre o comportamento dinâmico de um pressurizador tem como ponto de partida as equações de balanço de massa e energia para as fases líquida e gasosa, sendo os modelos mais realistas aqueles que se baseiam no não equilíbrio termodinâmico. Com isso, as equações de conservação da

massa e energia são aplicadas às duas fases, separadamente, considerando temperaturas e volumes distintos para cada fase.

Durante a compressão do vapor em um insurge, a condensação sobre as gotas do aspensor é o fenômeno mais importante no controle da pressão do sistema. Por ser atomizada e estar abaixo da temperatura de saturação, a água do aspensor normalmente atinge a saturação antes mesmo de chegar à interface líquido-vapor. Um aspensor apresenta baixa atomização quando resulta em gotas grandes, as quais podem não atingir a saturação enquanto caem pela fase de vapor.

Para a fase líquida, a definição dos volumes de controle tem sido alvo de várias modelagens em face da complexidade devida à distribuição não uniforme das temperaturas.

Normalmente, consideram-se três volumes de controle para a fase líquida: um volume de controle inferior contendo a água que entra pela linha de surtos, um volume de controle constituído da grande massa de líquido no pressurizador, e o volume superior, que contém água vinda do aspensor e também do vapor condensado.

2.3 REATOR IRIS

O reator IRIS é modular e refrigerado a água leve pressurizada com uma configuração integral da geração III+, com uma potência térmica de 1000MW (335 MW elétricos). O projeto iniciado em 1999 é fruto de um consórcio envolvendo 20 organizações entre indústrias, laboratórios e universidades, e dez países, gerenciado pela Companhia *Westinghouse Electric*.

As contribuições de cada membro do consórcio, através da transferência de tecnologia e fornecimento de dados experimentais, vêm possibilitando um acúmulo de informações valiosas ao desenvolvimento do projeto IRIS.

O vaso de pressão desse reator abriga além do combustível e das barras de controle, a maior parte dos componentes do circuito primário que constituem o sistema de refrigeração, tais como, bombas, geradores de vapor, pressurizador, mecanismos de barras de controle e o refletor de nêutrons. O vaso de pressão do reator IRIS, comparado ao vaso de pressão de um reator PWR, é maior, porém, as dimensões do sistema de contenção é bem menor, resultando em uma redução do tamanho global da instalação (WESTINGHOUSE, 2003a).

O projeto de um reator integral contribui para a eliminação de acidentes, o que não ocorre em reatores do tipo PWR, por exemplo. A ocorrência do Acidente de Perda de Refrigerante (*Loss of coolant accidents - LOCA*) é praticamente eliminada, uma vez que nesses tipos de reatores não há longos sistemas de tubulação. Os reatores PWR convencionais, diferentes dos reatores integrais, possuem os componentes (gerador de vapor, bombas, pressurizador, etc), individualizados e conectados ao vaso de pressão pela tubulação do circuito primário. A Figura 3 mostra um corte do vaso do reator IRIS (CARELLI et al., 2004).

A configuração integral do reator IRIS permite a construção de um grande *downcomer* com geometria anelar abaixo dos geradores de vapor, o qual separa o núcleo do vaso de pressão. Dentre os benefícios devidos a essa configuração, podem-se citar:

- O vaso do reator não sofre, praticamente, dano algum;
- Dispensa programas de vigilância do vaso;
- Redução da blindagem biológica e, mesmo com tal redução, não há exposição dos operários à radiação;
- O vaso do reator serve como um escudo para os componentes internos irradiados, simplificando a inativação do reator e o transporte de componentes.

O vaso de pressão e seus compartimentos internos são projetados para permitir o acesso ao combustível após a remoção da tampa e dos dispositivos internos superiores.

Assim, as estruturas de suporte das bombas de refrigeração e dos geradores de vapor são projetadas para permitir a remoção desses componentes para inspeção e substituição feitas externamente ao vaso. A princípio, o combustível do IRIS tem um enriquecimento igual a 4,95% de U235, ou seja, um valor abaixo do atual limite de 5%, a fim de satisfazer a exigência de combate à proliferação nuclear.

Na Figura 3 (CARELLI et al., 2004) alguns dos componentes presentes no interior do vaso de pressão: oito bombas refrigerantes de pequeno porte, oito geradores modulares de vapor e de formato helicoidal, um pressurizador localizado na parte superior do vaso, o mecanismo de guia das barras de controle e um refletor de aço envolvente do núcleo. Esse arranjo integral do vaso do reator exclui a necessidade de vasos individuais para cada componente, assim como as longas tubulações que os conectam, resultando em uma configuração mais compacta e minimizando as chances de ocorrência de LOCA.

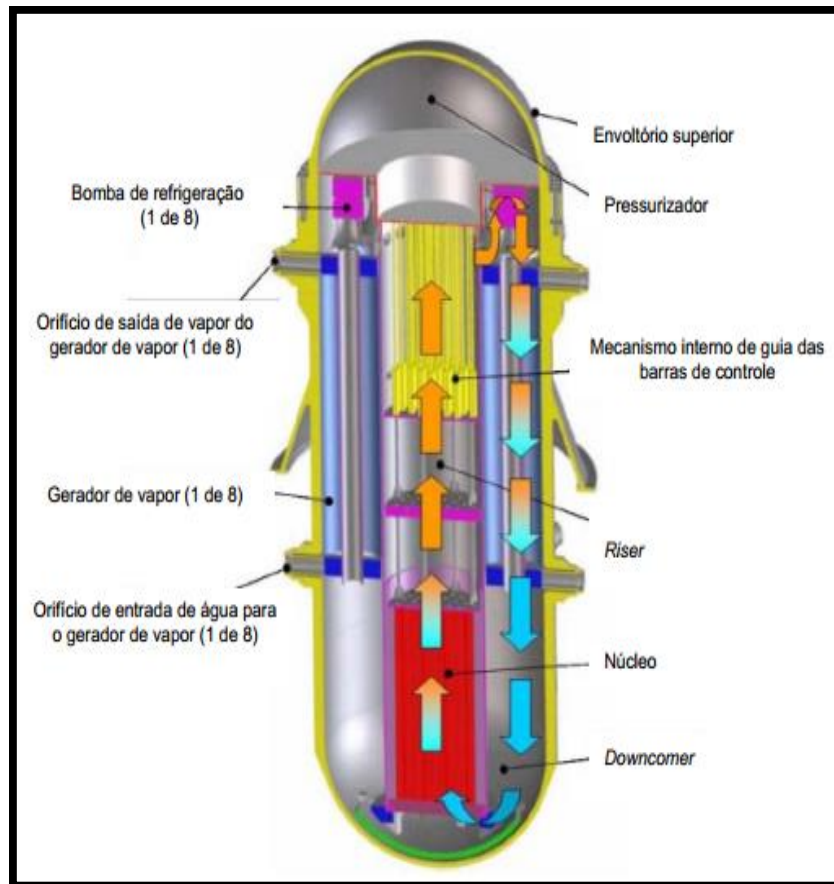


Figura 3: Vaso de pressão do reator IRIS

A eliminação de grandes LOCAs é possível graças à adoção de um sistema integral de refrigeração e a um amplo espaço acima do núcleo. Com esse espaço, é possível contar com um estoque adequado de água em casos de acidentes de perda de refrigerante de baixa e média intensidade, ao invés de depender de um sistema de injeção. O estoque de água ainda possui a finalidade de servir como trocador de calor em eventos de aquecimento excessivo (WESTINGHOUSE, 2003a).

Com as dimensões reduzidas devido à configuração integral, aliadas à geometria esférica mostrada na Figura 4, o sistema de contenção possui uma capacidade de suportar pressões três vezes maiores do que os sistemas convencionais cilíndricos quando se utiliza a mesma espessura de metal.

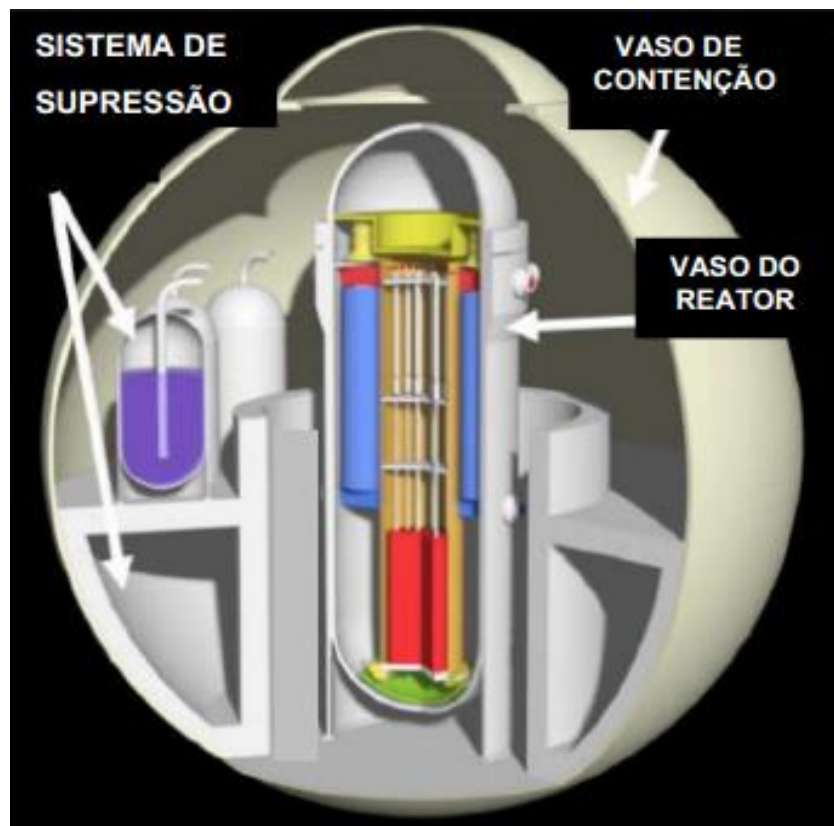


Figura 4: Contenção do IRIS

O grande espaço no interior do vaso de pressão do reator, além de facilitar a circulação natural do refrigerante, acomoda o sistema das barras de controle, eliminando a ejeção destas e sua penetração na parte superior do vaso, evitando a corrosão provocada pelo boro.

As bombas do IRIS estão inteiramente dispostas no interior do vaso de pressão, possuindo apenas pequenas penetrações externas para os cabos elétricos e para o suprimento da água de resfriamento. Tal localização, aliada à sua configuração geométrica, maximiza a inércia de rotação, originando fluxos de alta intensidade (CARELLI et al., 2004).

Várias configurações foram examinadas para os geradores de vapor do reator IRIS. Tomando-se por base os ciclos de operação e a experiência de projeto e de manutenção, geradores de vapor com tubos de formato helicoidal foram selecionados.

2.3.1 Pressurizador do reator ÍRIS

O pressurizador do reator IRIS fica situado na parte superior do vaso de pressão do reator. A água do pressurizador fica separada da água do fluido refrigerante do circuito primário por meio de uma estrutura interna em forma de um chapéu invertido, como mostrado na Figura 05 (BOTELHO et al., 2005a). Em um pressurizador, o parâmetro responsável por um bom desempenho corresponde à razão entre o volume de vapor presente no pressurizador e a potência térmica do reator. Tal razão indica a capacidade de redução da taxa de aumento da pressão durante transitórios de aquecimento. No reator IRIS, essa razão é bem maior do que a de um PWR convencional de dois circuitos.

Comparando-se com pressurizadores tradicionais, o pressurizador do IRIS dispõe de um amplo volume. A configuração integral desse reator permite o desenvolvimento de um sistema de pressurização bem mais espaçoso sem qualquer custo adicional. A razão entre o grande volume de vapor e a potência é o motivo pelo qual o reator IRIS dispensa aspersores, os quais são comumente utilizados em PWRs convencionais durante surtos de pressão (CARELLI et al., 2004).

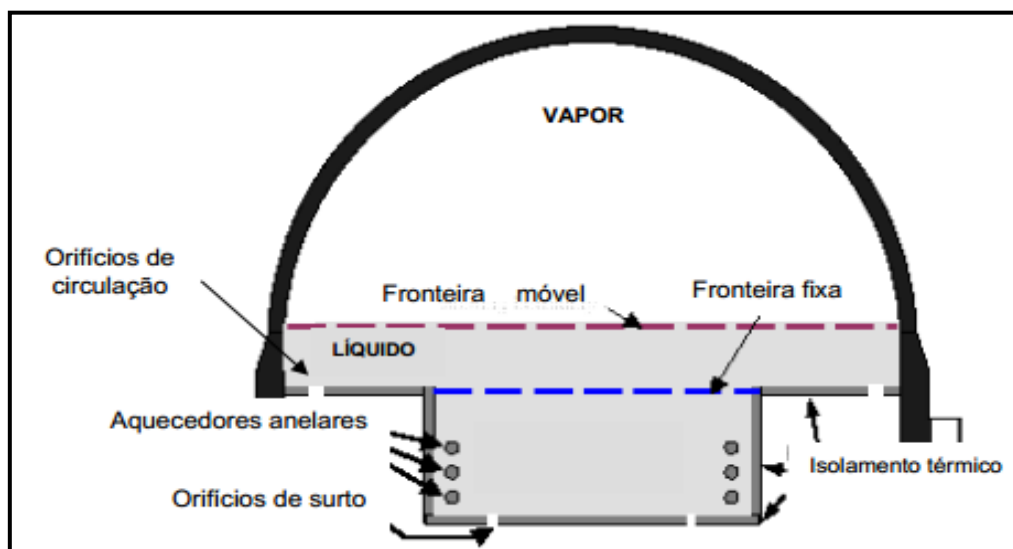


Figura 5: Corte transversal do pressurizador do reator IRIS

Os transitórios de insurge geram uma estratificação no pressurizador, fazendo com que a fase líquida permaneça inteiramente sub-resfriada, enquanto a fase gasosa,

superaquecida. Na ausência das circunstâncias que originam insurges, constatam-se condições termodinâmicas diferentes daquelas encontradas em sistemas que usam aspersiones. A razão para tal fenômeno é a ausência, no reator IRIS, da ação homogeneizante do aspersor, resultando num retorno mais lento às condições estacionárias. Entretanto uma linha auxiliar de aspersor poderá ser adotada, a qual não terá qualquer função durante as operações de potência, devendo ser usada tão somente no desligamento da instalação (BARROSO et al., 2004).

No pressurizador do reator IRIS tem aquecedores que são projetados para gerar água saturada e vapor suficiente para prevenir a queda de pressão em casos de elevação de potência nas turbinas.

A questão da homogeneização do boro no interior do pressurizador do reator IRIS é muito importante durante as operações de elevação e redução de potência. Em seu trabalho, SILVA, (2008), através de uma nova metodologia de similaridade, conhecida como Análise de Escala Fracional, ou FSA (ZUBER et al., 2005), (WULFF et al., 2005), projetou uma seção de testes que permitirá a realização de experimentos envolvendo a dispersão de boro no interior do pressurizador. Foi determinada a ordem de grandeza dos principais parâmetros para construção de uma seção de testes, permitindo-se uma margem de segurança para ajustes posteriores. A construção de uma bancada experimental com seção de testes simulando o pressurizador do reator IRIS, permitirá a realização de experimentos com o objetivo de se estudar a homogeneização da concentração do boro no interior do pressurizador, gerando informações importantes para que se possa aperfeiçoar as condições de projeto.

2.4 HOMOGENEIZAÇÃO DO BORO

Recentemente, estudos de transitórios com deficiência na homogeneização de boro em reatores de água pressurizada vêm recebendo bastante atenção. A solução de ácido bórico, normalmente, é adicionada ao refrigerante do circuito primário,

auxiliando no controle das taxas de fissão no núcleo do reator. Entretanto, esse sistema não consegue controlar a reatividade, já que a mudança na concentração de boro não atua tão rapidamente para satisfazer os requisitos de segurança como o fazem as barras de controle.

Ao desligar um reator PWR, o boro presente no refrigerante tem a função de manter o reator no estado de subcriticalidade. No caso em que a água com baixa concentração de boro seja introduzida acidentalmente, será necessário fazer uma homogeneização para que volumes d'água contendo pouca quantidade de boro não atinjam o vaso do reator e reiniciem a criticalidade.

A mistura entre os fluidos com diferentes concentrações de boro depende da geometria do caminho de escoamento, e devido à complexidade geométrica dessa região em reatores PWR, a investigação feita com códigos computacionais CFD é complementada com análises experimentais para o fornecimento de dados espaciais e temporais confiáveis (KIGER & GAVELLI, 2001).

A deficiência na homogeneização está relacionada a eventos externos ou internos que conduzem à formação, no sistema primário, de volumes parcialmente ou completamente desprovidos de boro. Eventos externos são aqueles caracterizados pela injeção de água pura ou solução diluída de boro proveniente, por exemplo, de tanques de acumulação dos sistemas de controle químico e volumétrico em operações inadequadas de desligamento. Já os eventos internos de diluição ocorrem no próprio sistema primário, como por exemplo, o fenômeno de transferência de calor nos regimes de vaporização-condensação.

A independência da mistura de boro em relação ao número de Reynolds também foi constatada em investigações realizadas por GAVRILAS & PALAZOV (1999). Entretanto, CATRAKIS & DIMOTAKIS (1996), realizando experimentos com jatos turbulentos e utilizando técnicas de imagens com fluorescência induzida a laser, constataram certa dependência da distribuição de concentração de substâncias em relação ao número de Reynolds. Através de análises feitas por PERONA et. al. (1998),

também se constatou uma considerável influência do número de Reynolds no tempo de homogeneização. Esse tempo, porém, não era função exclusiva desse adimensional, mas variava de acordo com a posição em que o jato de concentração diferente era inserido.

3 DINÂMICA DE FLUIDO COMPUTACIONAL

A dinâmica de fluidos computacional (Em inglês, *Computational Fluid Dynamic* (CFD)), pode ser definida como um conjunto de técnicas matemáticas e computacionais usadas para o estudo qualitativo e quantitativo de fenômenos que envolvem o escoamento de fluidos. Basicamente, o interesse é obter as distribuições de velocidades, pressões e temperaturas na região do escoamento. Esses dados podem ser utilizados por físicos, químicos, engenheiros ou arquitetos para prever o comportamento de um processo ou material em determinadas condições assumidas ou aferidas.

Resultados de simulações numéricas não devem ser assumidos sem análise criteriosa, uma vez que se o usuário faz uso de condições iniciais e de contorno e modelos matemáticos e/ou numéricos que não correspondam ao sistema que ele deseja simular, os resultados numéricos serão incompatíveis com a realidade do sistema. Portanto, pode-se afirmar que o uso de métodos numéricos não implica que a mecânica dos fluidos experimental e as análises teóricas estejam sendo postas de lado. É comum que as três técnicas se complementem durante um projeto que envolva escoamentos de fluidos ou em estudos de modelos teóricos para algum fenômeno particular, como escoamentos turbulentos.

O objetivo das simulações com CFD é reduzir o número de experimentos e explorar fenômenos que não poderiam ser estudados em laboratório de forma prática. Dentre as vantagens do uso das técnicas de CFD, pode-se citar: redução de tempo e gastos com novos projetos; habilidade para estudar sistemas onde é difícil ou até mesmo impossível de se medir o valor de uma propriedade, como por exemplo, a temperatura no núcleo de reatores nucleares.

O objetivo das simulações com CFD é reduzir o número de experimentos e explorar fenômenos que não poderiam ser estudados em laboratório de forma prática. Dentre as vantagens do uso das técnicas de CFD, pode-se citar: redução de tempo e

de gastos com novos projetos; habilidade para estudar sistemas onde é difícil ou até mesmo impossível medir o valor de uma propriedade, como por exemplo, a temperatura no núcleo de reatores nucleares.

Para tratar computacionalmente um problema de escoamento de fluidos, é necessário expressar as equações e o domínio em que elas são válidas de forma adequada. Como não é possível obter solução numérica sobre um domínio contínuo, posto que em um método numérico só é possível a obtenção de solução em pontos específicos pré-definidos, enquanto que um meio contínuo é, por definição, formado por infinitos pontos. Portanto, inicialmente o domínio contínuo é discretizado, isto é, dividido em pontos ou em volumes de controle e somente nesses pontos (ou volumes) é que as soluções serão obtidas. Ao conjunto de pontos discretos dá-se o nome de malha. Quanto maior for o número de pontos discretos, ou, em outras palavras, quanto mais fina for a malha, mais fiel ao modelo será o resultado numérico obtido. Em contrapartida, o tempo de simulação será maior, podendo, em alguns casos, levar horas ou até mesmo dias até que a solução do problema seja encontrada.

Para a resolução de um problema via simulação CFD, pode-se utilizar o método de discretização denominado *método dos volumes finitos* (MVF). Devido a sua utilização no código Ansys, e em particular dentro do software CFX, mais detalhes do MVF serão fornecidos na Seção 3.3.

3.1 COMO TRABALHA UM CÓDIGO CFD

Para prover fácil acesso a seus usuários, todos os pacotes comerciais de CFD incluem uma sofisticada interface a fim de facilitar a inserção dos parâmetros dos problemas, assim como a extração de seus resultados. O pacote Ansys 12.1 onde está inserido o software CFX possui um conjunto de cinco etapas que estão descritas abaixo:

- Geometria: Onde é possível fazer toda configuração do problema que se deseja estudar, construindo seu domínio.
- Malha: Parte do programa onde se pode criar a malha de volumes finitos e refiná-la de acordo com seu interesse.
- Setup: Onde se define toda parte física do problema como: tipo de escoamento, material e condições de contorno.
- Solution: Parte do programa responsável por solucionar as equações do modelo.
- Results: Parte do programa onde se cria gráficos e analisa partes específicas do seu domínio, como planos de simetria previamente definidas no setup. Podendo ser observado toda interface gráfica criada e analisar grandezas como: velocidade, pressão e temperatura.

3.2 EQUAÇÕES DO MODELO

O CFX utiliza as equações de conservação de Navier-Stokes, estas são resolvidas a cada iteração e em cada volume de controle, as equações de conservação da massa, momento e energia utilizadas são:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot U) = 0 \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot U \otimes U) = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (3-2)$$

Onde τ representa o tensor de tensões que está associado à taxa de deformação dado por: $\tau = \mu(\nabla \cdot U + (\nabla \cdot U)^T - \frac{2}{3}\delta\nabla \cdot U)$.

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla \cdot T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + US_M + S_E \quad (3-3)$$

Onde: $h_{tot} = h + \frac{1}{2}U^2$ representa a entalpia total e o termo $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ representa o trabalho das tensões viscosas e o termo US_M representa o momento das fontes externas de momento.

Para solucionar o problema em questão foi necessário definir uma nova variável desconhecida para o programa, esta ferramenta permite criar uma variável e associar a ela um modelo matemático pré-existente no programa, nesse caso foi usado o modelo de equação de transporte recomendável para análise de variáveis de massa por volume ou concentrações. Como queríamos medir a concentração de Ácido Bórico no interior do domínio, foi definida uma grandeza “ ϕ ” e o modelo de equação de transporte associado a ela está representado pela equação(3-4).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho \cdot U \cdot \phi) = \nabla \cdot (\rho \cdot D_\phi \cdot \nabla\phi) + S_\phi \quad (3-4)$$

Onde D_ϕ representa o coeficiente de difusividade cinemática e S_ϕ representa um termo fonte volumétrico.

Assim, o CFX além de solucionar as equações de Navier-Stokes a cada iteração, também encontrará uma solução para nova variável definida, mas para que o programa consiga solucioná-la é necessário fornecer o coeficiente de difusividade do Ácido Bórico na água, este valor não é encontrado na literatura, onde $D_\phi = 10,1 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Este valor foi conseguido com técnicos da área de segurança nuclear da usina de Angra dos Reis.

3.3 MÉTODO DE VOLUMES FINITOS

O ANSYS CFX utiliza um elemento baseado em método de volumes finitos, que primeiro envolve a discretização do domínio espacial usando uma malha. A malha é usada para construir volumes finitos, que são usados para conservar quantidades relevantes, tais como massa, momento, e energia. Ela é tridimensional, mas por simplicidade, a Figura 6 irá ilustrar este processo para duas dimensões.

Todas as variáveis de solução e propriedades do fluido são armazenadas nos nós (vértices da malha). Um volume de controle (a área sombreada) é construído em torno de cada nó de malha usando a mediana dupla (definida pelas linhas que unem os centros das arestas e os centros de elementos em torno do nó).

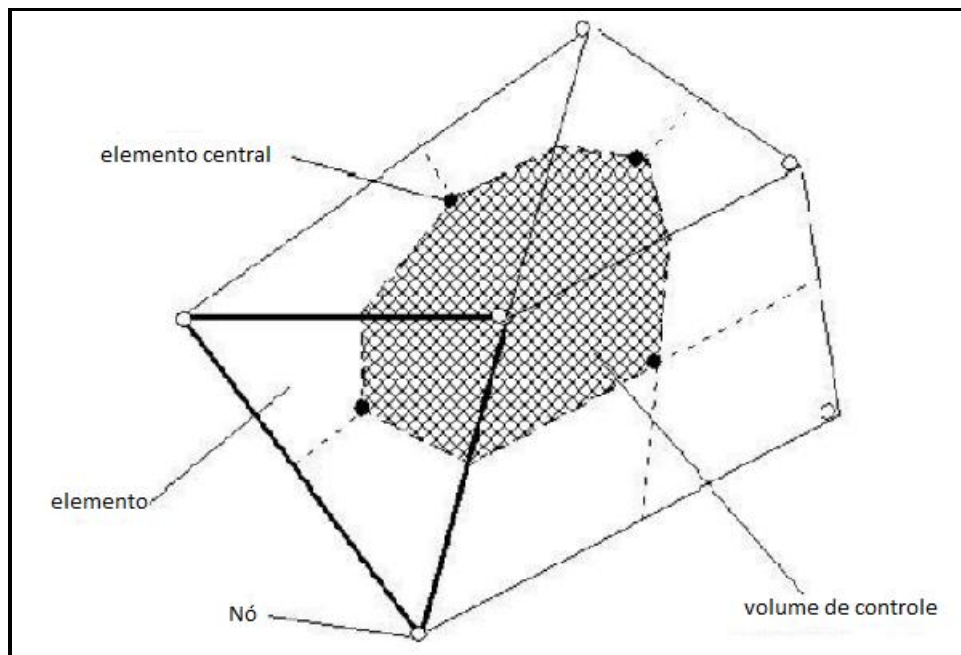


Figura 6: Definição de volume de controle

Para ilustrar a metodologia de volumes finitos, as equações de conservação de massa, momento e um escalar passivo, expressas em coordenadas cartesianas são:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (3-5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)) \quad (3-6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) + S_\phi \quad (3-7)$$

Essas equações são integradas sobre cada volume de controle, e o Teorema de Gauss da divergência, é aplicado para converter integrais de volume envolvendo divergência e operadores gradiente em integrais de superfície. Se o volume de controle não se deforma no tempo, as derivadas do tempo podem ser colocadas para fora das integrais de volume e as equações integrais tornam-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_S \rho U_j = 0 \quad (3-8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho U_i dV + \int_S \rho U_j U_i dn_j \\ = - \int_S P dn_j + \int_S \mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_V S U_i dV \end{aligned} \quad (3-9)$$

$$\int_V \rho \phi dV + \int_S \rho U_j \phi dn_j = \int_S \Gamma_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} dn_j + \int_V S_\phi \quad (3-10)$$

Em que V e S , denotam respectivamente volume e regiões da superfície de integração, e os componentes dn_j são diferenciais cartesianas do vetor superfície normal. As integrais de volume representam termos de origem ou de acumulação, e as integrais de superfície representam o somatório dos fluxos. Observe que as alterações dessas equações precisam de alguma generalização para explicar a deformação da malha. O próximo passo no algoritmo numérico é discretizar o volume e integrais de superfície. Para ilustrar esse passo, considere um único elemento como o mostrado na Figura 7.

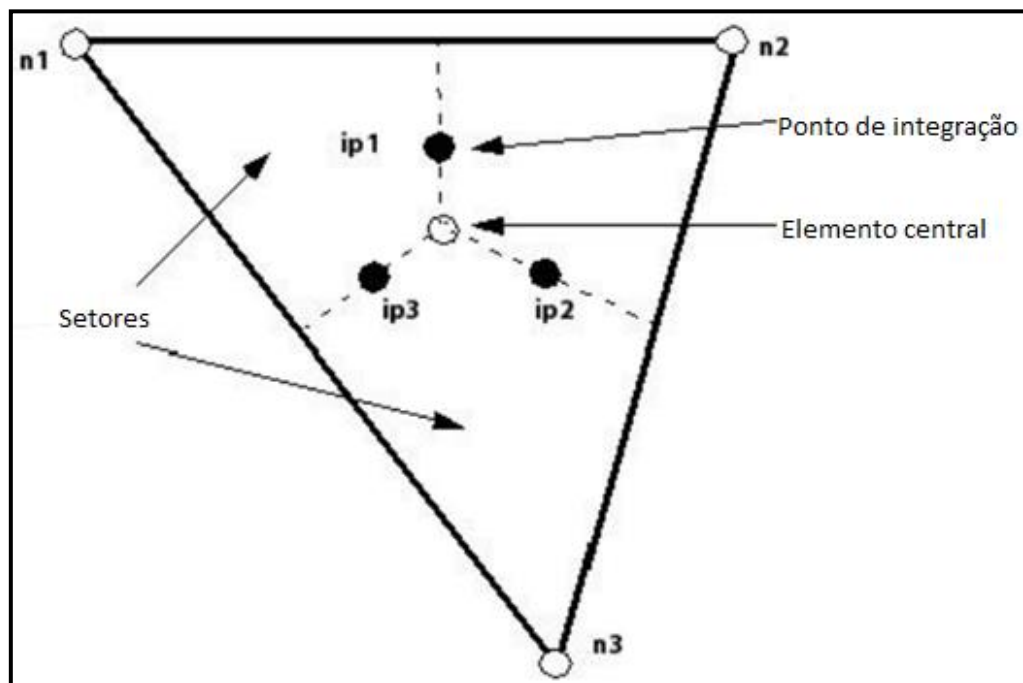


Figura 7: Elemento de malha

Integrais de volume são discretizadas dentro de cada setor e o elemento acumulado para o controle de volume para o qual o setor pertence. Integrais de superfície são discretizados com os pontos de integração (ip_n) localizadas no centro de cada segmento de superfície dentro de um elemento e depois distribuído para os volumes de controle adjacentes. As integrais de superfície são iguais e opostas para os volumes de controle adjacentes aos pontos de integração, as integrais de superfície estão garantidas para serem localmente conservada. Depois da discretização das integrais de volume e de superfície, as equações integrais tornam-se:

$$V \left(\frac{\rho - \rho^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} = 0 \quad (3-11)$$

$$V \left(\frac{\rho U_i - \rho^0 U^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} (U_i)_{ip} = \sum_{ip} (\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j)_{ip} + \overline{S U_i} V \quad (3-12)$$

$$V \left(\frac{\rho \phi - \rho^0 \phi^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} \phi_{ip} = \sum_{ip} (\Gamma_{eff} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \Delta n_j)_{ip} + \overline{S_\phi} V \quad (3-13)$$

O “i” e “p” subscritos denotam a avaliação em um ponto de integração, que são somatórios sobre todos os pontos de integração do volume de controle, e o sobrescrito refere-se ao nível dos velhos tempos.

4 METODOLOGIA

A tese de doutoramento apresentada por Jair Bezerra (BEZERRA, 2012) serviu como motivação inicial. A proposta do presente trabalho é simular o experimento realizado por Bezerra utilizando técnicas de CFD através do código CFX. O fluxograma e os dados do experimento estão apresentados no apêndice A do texto.

A partir deste contexto, uma proposta de trabalho foi realizada focando a utilização de simulações em CFD que pudessem verificar com a utilização de modelos matemáticos mais sofisticados como a homogeneização do Boro acontece no interior da seção de testes. A partir desta informação, uma modelagem foi feita utilizando o Ansys CFX, que se baseia no experimento apresentado na Figura 32. A construção da simulação utilizou apenas $\frac{1}{4}$ do pressurizador por questões de simetria do domínio, a Figura 8 mostra a parte que será modelada no programa, uma vez que a quantidade de boro presente na região de vapor pode ser desconsiderada. Toda simulação foi feita a temperatura ambiente de 25 °C e a pressão atmosférica.

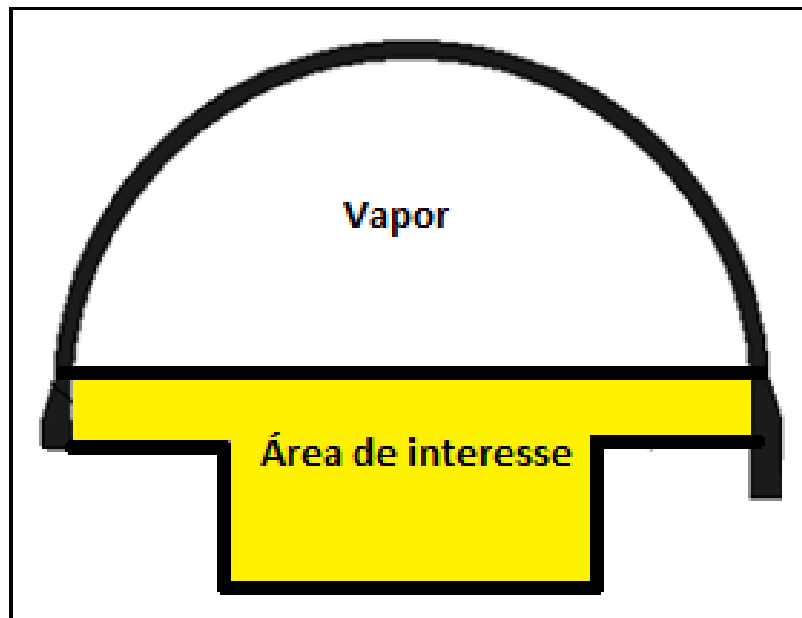


Figura 8: Representação da região de interesse na simulação.

Levando-se em consideração os resultados encontrados por Bezerra e em comunicações pessoais com o pesquisador, uma das principais metas era conceber uma forma de possibilitar os estudos de caso sem precisar de um tempo muito grande para a obtenção de resultados, com isso, a ferramenta Ansys CFX ganha importância, pois a partir do momento que o ambiente de pré-processamento está modelado pode-se fazer estudos de caso sem grandes dificuldades.

Inicialmente foi feita uma validação da simulação, comparando-se os resultados teóricos do modelo utilizado no experimento e a solução fornecida pela simulação do CFX. Todos os parâmetros utilizados estão descritos na Tabela 19. Como o experimento foi realizado com uma vazão de entrada de 15 L/h, o escoamento não apresenta turbulências adotando-se o modelo de escoamento laminar. A geometria utilizada representa $\frac{1}{4}$ do pressurizador, assim, ao escolher as condições de contorno na parede, poderia ter sido escolhida, também, uma condição de simetria, mas como o objetivo era simular o próprio experimento foi utilizada a condição de parede suave, que não apresenta resistências ao escoamento.

Após esta etapa de validação do código computacional, fez-se necessária uma comparação com os resultados experimentais encontrados, mas por dificuldades apresentadas pelo próprio Bezerra, uma comparação mais quantitativa e direta ficou comprometida, pois para fazer sua análise ele utilizou uma técnica que apurava os tons de cinza tirados com uma máquina posicionada à frente da parede da seção de testes, este processamento fornecia uma grandeza relacionada à concentração do fluido no interior da seção de testes, mas não foi encontrado o valor da concentração média em unidade ppm. Com isso, passou-se a analisar o comportamento experimental de uma maneira qualitativa, isto é, a análise baseou-se apenas nos comportamentos observados nas curvas experimentais e nas simuladas.

Após essa etapa de comparação foram feitos estudos de caso variando parâmetros que pudessem tornar a homogeneização do boro o mais otimizada possível. Foram feitas variações como: do diâmetro de entrada e de saída, do posicionamento da entrada e da saída e também da vazão do escoamento.

As simulações de todos os experimentos foram feitas durante um transiente de 10 horas à temperatura ambiente, e os resultados da concentração ao longo do tempo foram registrados a cada 100 segundos.

5 MODELAGEM COMPUTACIONAL

5.1 MODELAGEM GEOMÉTRICA

No ambiente de modelagem computacional, é possível construir modelos geométricos para as simulações propostas e também definir o domínio e seus limites físicos. As Figura 9, Figura 10 e Figura 11 mostram a geometria criada para os três experimentos, que representa a geometria da seção de testes apresentada na Figura 32, correspondente a apenas $\frac{1}{4}$ do pressurizador.

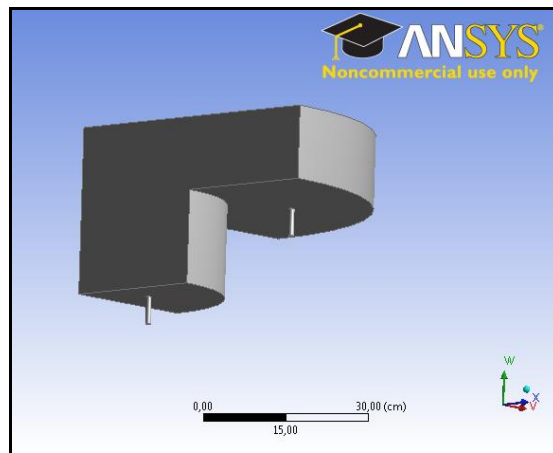


Figura 9: Geometria do experimento A

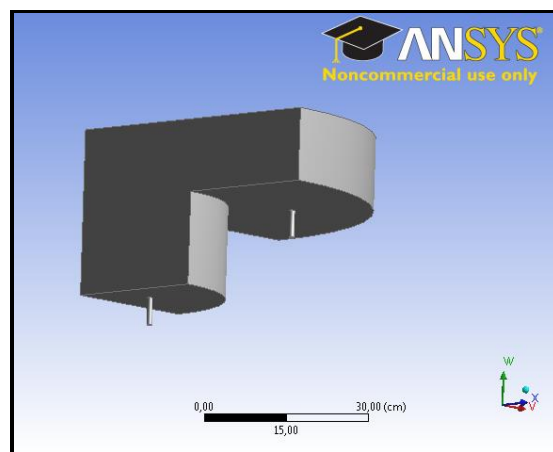


Figura 10: Geometria do experimento B

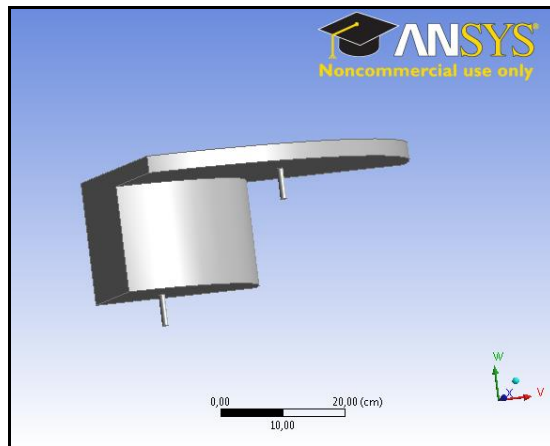


Figura 11: Geometria do experimento C

A construção dos modelos foi baseada nas dimensões apresentadas no experimento de Bezerra. Toda a parte geométrica foi construída dentro da plataforma Ansys 12.1 utilizando a ferramenta *design modeler*. A geometria apresentada representa apenas a quantidade de água dentro da seção de testes do experimento. Tal fato se torna relevante em relação ao tempo de processamento do experimento onde um maior volume implicaria em um malha com um número maior de elementos a serem discretizados, além de mais equações para serem solucionadas, este encolhimento é possível porque na região 3 do pressurizador do IRIS não há quantidades significativas de Boro.

5.2 GERAÇÃO DE MALHA

Neste ambiente, importa-se a geometria previamente construída e assim é gerada a malha que discretiza o domínio em volumes finitos. Nesse ponto são especificadas todas as características da malha como seu tipo, dimensão mínima das arestas e outros parâmetros existentes no programa, as Figura 12, Figura 13 e Figura 14 apresentam suas respectivas malhas.

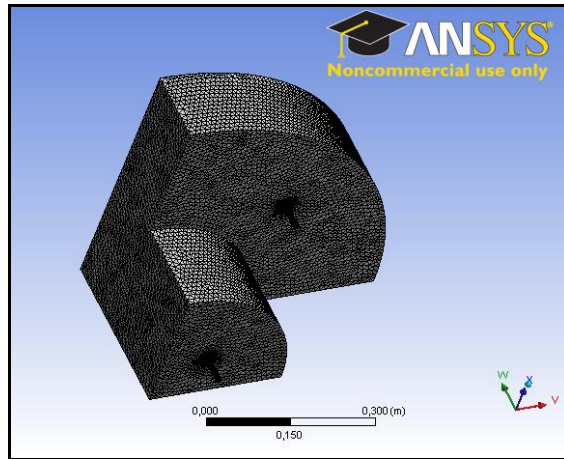


Figura 12: Malha do experimento A

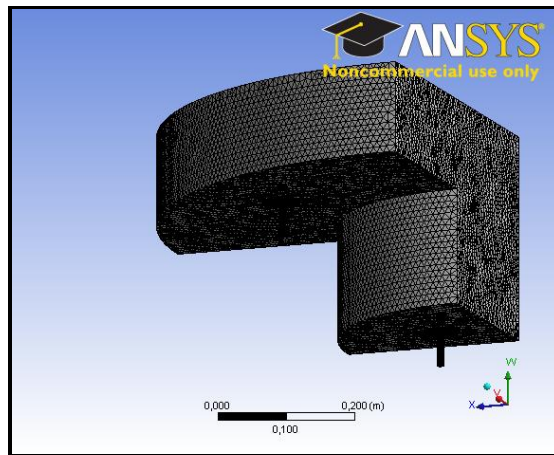


Figura 13: Malha do experimento B

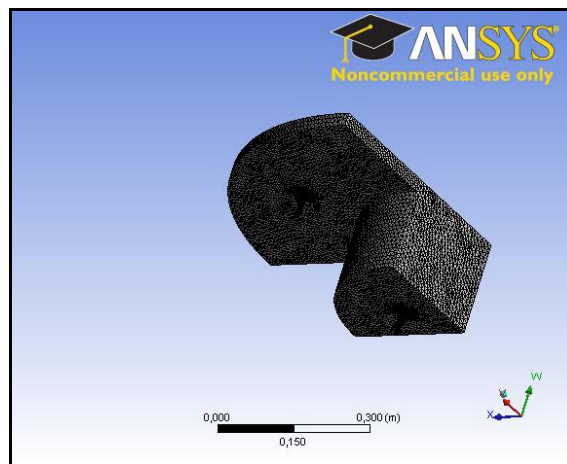


Figura 14: Malha do experimento C

Para os três experimentos apresentados, foram construídas malhas não estruturadas e com número fixo de elementos, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Elementos da malha de cada experimento

Tipo de experimento	Nós	Numero de elementos
Experimento A	39394	200862
Experimento B	37091	189428
Experimento C	22922	110684

A dimensão dos elementos é um detalhe importante a ser escolhido, pois não se pode construir uma malha com elementos pequenos ao ponto em que sua dimensão seja menor que o livre caminho médio das moléculas. Também é possível a utilização de uma regra a partir dos resultados das principais grandezas envolvidas na simulação, e assim escolher um critério de parada a partir dos resultados obtidos. Se um refinamento maior implicar apenas em mais equações com mais tempo de simulação e resultados muito próximos do anterior, não vale a pena o refinamento.

5.3 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

A modelagem do problema foi também baseada no experimento de Bezerra. Após a etapa de geração de malha, a interface de pré-processamento, denominada *setup*, é responsável por toda a definição do modelo que será utilizado na solução do problema em questão.

Para simular e fixar as condições de operação de cada situação foi utilizado o ambiente de pré-processamento do Ansys CFX. Nesse ambiente foram especificados todos os parâmetros de cada domínio como tipo de fluido, temperatura, modelo de turbulência, condições de entrada, etc.

Para todos os experimentos foram usadas vazões de entrada e de saída de 15 l/h e diâmetros de entrada e de saída de 10 mm. O tipo de escoamento utilizado foi laminar e o principal fenômeno estudado foi conhecer como o Ácido Bórico se distribui no interior do pressurizador em três estágios de potência 100%, 20% e 0%.

5.4 PROCESSAMENTO

Depois de definidos todos os parâmetros de solução no ambiente de pré-processamento e as condições de contorno para o problema em questão, foi especificada uma simulação do tipo transiente com duração de 10 horas, utilizando discretização de 100 segundos.

Para realizar a simulação foi utilizada uma estação de trabalho com 12 processadores *Intel Xeon X5560* de 2.8 Gz e 12 GB de memória RAM, funcionando com um sistema operacional Suse Server 64-bit. As simulações foram processadas utilizando-se 12 processadores em paralelo sob protocolo de comunicação MPI (*Message Passing Interface*) local. Nesse protocolo a geometria é dividida em um número de partes correspondente ao número de processadores utilizados. O programa Ansys CFX possibilita utilizar esta biblioteca de paralelização de maneira simples, sendo necessário apenas especificar o endereço das máquinas e o número de processadores utilizados.

6 VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO

6.1 EXPERIMENTO “A”

A Figura 15 ilustra o gráfico de comparação para o experimento “A”, entre a solução analítica do modelo utilizado no experimento e a solução encontrada pela simulação no CFX. Observa-se o mesmo comportamento assintótico das curvas, que tendem a um valor máximo de concentração. A diferença existente entre os valores encontrados pelo modelo experimental e usando-se o CFX pode estar relacionada ao fato de a solução analítica não levar em conta a geometria do problema. A homogeneização em ambos os casos encontra-se em torno de 5 horas.

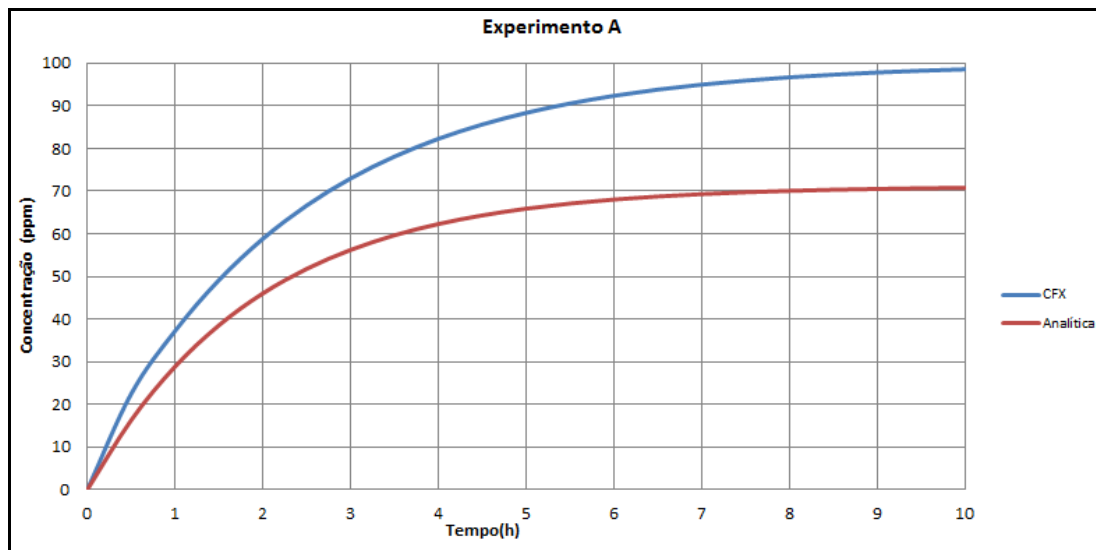


Figura 15: Gráfico comparativo do experimento “A”

A Tabela 2 mostra os valores da concentração média encontradas pelo CFX e pelo MATLAB em intervalos de tempo de uma hora, com seus respectivos desvios relativos.

Tabela 2: Valores da concentração média em ppm em intervalos de 1 hora.

Tempo (h)	Conc_CFX (ppm)	Conc_MATLAB (ppm)	Desvio relativo (%)
0,0	0,0	0,0	-
1,0	37,2	28,9	22
2,0	58,8	38,6	21
3,0	73,0	56,2	22
4,0	82,3	62,3	24
5,0	88,4	65,9	25
6,0	92,4	68,1	26
7,0	95,0	69,3	27
8,0	96,7	70,1	27
9,0	98,0	70,5	27
10,0	98,5	70,8	28

6.2 EXPERIMENTO “B”

A Figura 16 mostra o gráfico de comparação para o experimento “B”, entre a solução analítica e a simulação no CFX. Pode-se perceber também um comportamento assintótico e uma condição de homogeneização no mesmo intervalo que o experimento “A”, e tal fato pode estar relacionado com a pequena diferença entre o volume de água na seção de testes para os experimentos “A” e “B” que é de apenas 0,1 litros.

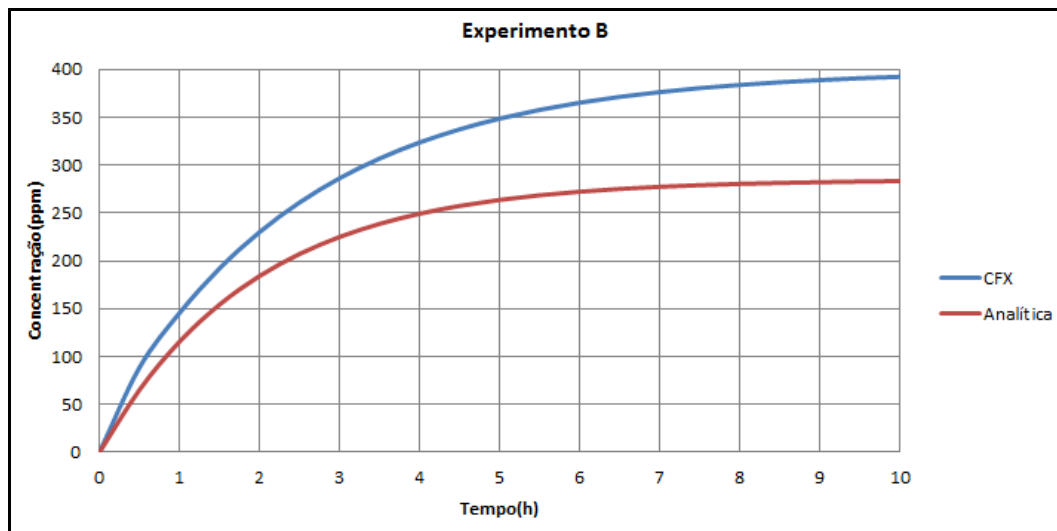


Figura 16: Gráfico comparativo do experimento "B"

A Tabela 3 mostra os valores da concentração média encontradas pelo CFX e pelo MATLAB em intervalos de tempo de uma hora, com seus respectivos desvios relativos.

Tabela 3: Valores da concentração média em PPM em intervalos de 1 hora.

Tempo (h)	Conc_CFX (ppm)	Conc_MATLAB (ppm)	Desvio relativo (%)
0,0	0,0	0,0	-
1,0	145,6	115,6	20
2,0	230,6	184,3	19
3,0	286,5	225,1	21
4,0	323,9	249,4	23
5,0	348,9	263,8	24
6,0	365,5	272,4	25
7,0	376,6	277,5	25
8,0	384,1	280,6	26
9,0	389,1	282,4	27
10,0	392,5	283,4	27

6.3 EXPERIMENTO “C”

A Figura 17 mostra o gráfico de comparação entre os modelos para o experimento “C”. Observa-se que a homogeneização ocorre em torno de 2 horas. É razoável que isso possa estar relacionado com o fato da quantidade de água neste experimento ser menor, e também por possuir uma concentração de entrada mais elevada.

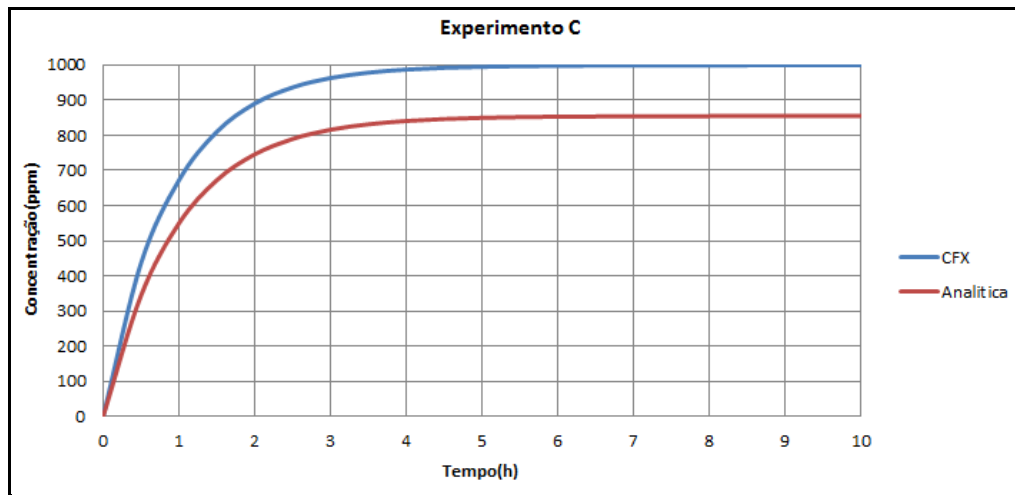


Figura 17: Comparação do experimento “C”

A Tabela 4 mostra valores da concentração média encontradas pelo CFX e pelo MATLAB em intervalos de tempo de uma hora, com seus respectivos desvios relativos.

Tabela 4: Valores da concentração média em PPM em intervalos de 1 hora.

Tempo (h)	Conc_CFX (ppm)	Conc_MATLAB (ppm)	Desvio Relativo (%)
0,0	0,0	0,0	-
1,0	672,4	549,8	18
2,0	890,4	746,0	16
3,0	963,3	816,1	15
4,0	987,3	841,1	14
5,0	995,3	850,6	14
6,0	997,9	853,2	14
7,0	998,9	854,4	14
8,0	999,2	854,7	14
9,0	999,5	854,9	14
10,0	999,5	854,9	14

Com base na análise realizada, é possível chegar a uma conclusão em relação à simulação do CFX e a solução analítica: em todos os casos estudados a simulação obteve um comportamento dentro do esperado, apresentando pequenas diferenças de valores máximos de concentração, o que pode ser explicado pelo fato de a solução analítica não levar em consideração a geometria do problema, sendo esta diferença quantificada pelo desvio entre 20% e 30%.

A partir dessas informações poderão ser feitas investigações em determinados parâmetros tais como: diâmetros de entrada e de saída, posição em que se encontram, e variações de vazão do escoamento, com o objetivo de analisar se esses fatores podem ou não auxiliar na homogeneização do Ácido Bórico, chegando assim a uma contribuição significativa para fabricações futuras do projeto IRIS.

7 COMPARAÇÃO QUALITATIVA DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Uma comparação com os dados experimentais se faz necessário, mas como mencionado anteriormente, a metodologia de coleta de dados experimentais tornou difícil esta tal comparação, mas após conversas com o próprio experimentalista, chega-se a conclusão de que é possível fazer-se uma comparação qualitativa e analisar o comportamento da curva em ambos os casos (experimental e o simulado). As Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7 mostram os valores da concentração normalizada, que representa os valores de tons de cinza coletados com o programa DIP pelo pesquisador.

7.1 EXPERIMENTO “A”

A Figura 18 mostra o gráfico do comportamento da concentração normalizada como função do tempo dos dados experimentais encontrados por Bezerra.

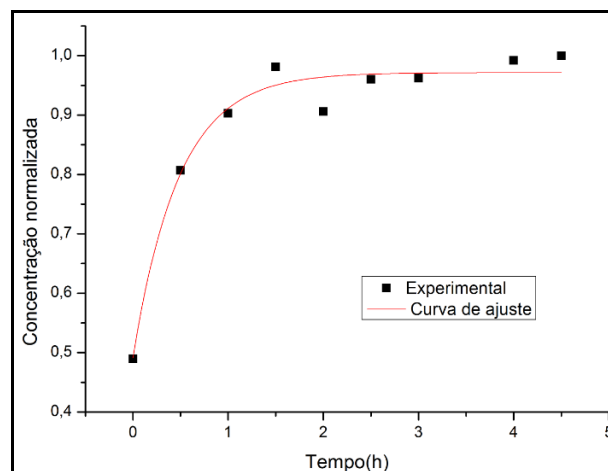


Figura 18: Gráfico da concentração normalizada x tempo

A Tabela 5 mostra os valores experimentais encontrados, onde a terceira coluna apresenta os valores da concentração normalizados pelo maior valor encontrado (N=185,8), e que foram usados para construção dos gráficos.

Tabela 5: Dados experimentais do experimento "A"

Tempo (h)	Tons de cinza	Tons de cinza/N
0,0	0,0	0,0
0,03	91,2	0,49
0,5	144,2	0,81
1,0	149,9	0,91
1,5	167,9	0,98
2,0	182,2	0,91
2,5	168,3	0,96
3,0	178,4	0,96
4,0	184,3	0,99
4,5	185,8	1,0

Como mostrado na Figura 15, o comportamento da concentração em função do tempo para solução analítica e da simulação, observa-se o comportamento da curva similar para os três casos mostrados. Em todos eles observa-se um comportamento assintótico, garantindo-se a homogeneização do boro na seção de testes.

7.2 EXPERIMENTO " B "

A Figura 19 mostra o gráfico do comportamento da concentração normalizada em função do tempo dos dados experimentais encontrados por Bezerra.

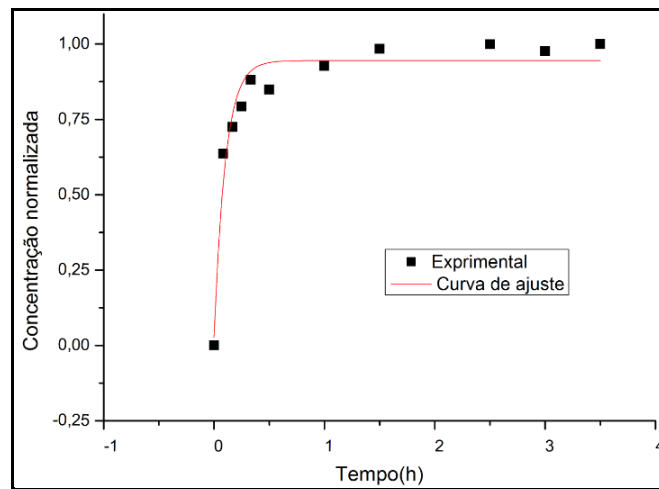


Figura 19: Gráfico da concentração normalizada x tempo

A Tabela 6 mostra os valores experimentais encontrados, e a sua terceira coluna apresenta os valores da concentração, normalizados pelo maior valor encontrado ($N=205,2$), que foram usados para construção dos gráficos.

Tabela 6: Dados experimentais do experimento “B”

Tempo (h)	Tons de cinza	Tons de cinza/N
0,00	0,0	0,00
0,08	130,5	0,64
0,16	148,8	0,73
0,25	162,7	0,79
0,33	181,1	0,88
0,50	174,1	0,85
1,00	190,1	0,93
1,50	201,9	0,98
2,50	205,0	0,99
3,00	203,2	0,98
3,50	205,2	1,0

Como mostrado na Figura 16, o comportamento da concentração em função do tempo para solução analítica e para a simulação é similar para os três casos mostrados.

Em todos eles observa-se um comportamento assintótico, o que garante a homogeneização do boro na seção de testes, como mostrado na seção anterior para o experimento B.

7.3 EXPERIMENTO “C”

A Figura 20 ilustra o gráfico do comportamento da concentração normalizada em função do tempo dos dados experimentais encontrados por Bezerra.

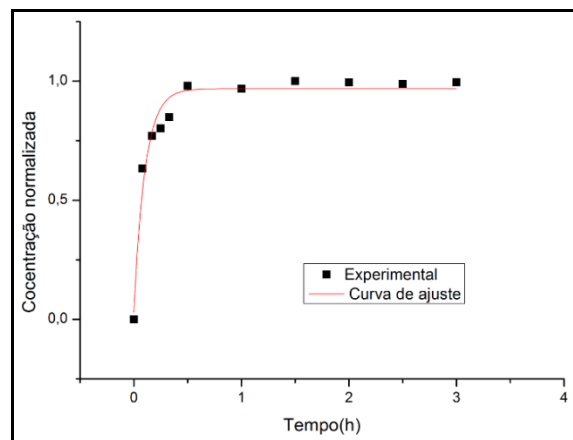


Figura 20: Gráfico da concentração normalizada x tempo

A Tabela 7 mostra os valores experimentais encontrados e a terceira coluna apresenta os valores da concentração, normalizados pelo maior valor encontrado ($N=227,2$), que foram usados para construção dos gráficos.

Tabela 7: Dados experimentais do experimento “C”

Tempo (h)	Tons de cinza	Tons de cinza/N
0,00	0,0	0,00
0,08	143,9	0,63
0,17	174,8	0,77
0,25	182,2	0,80
0,33	192,7	0,85
0,50	222,7	0,98
1,00	219,9	0,97
1,50	227,2	1,00
2,00	225,9	0,99
2,50	224,8	0,99
3,00	226,4	0,99

A Figura 17, mostra o comportamento da concentração em função do tempo para solução analítica e para a simulação, e novamente percebe-se o comportamento da curva similar para os três casos mostrados. Em todos os casos observa-se o comportamento assintótico, garantindo-se a homogeneização do boro na seção de testes, como mostrado na seção anterior para os experimentos “A” e “B”.

Os resultados experimentais, quando comparados de forma qualitativa, apresentam o mesmo comportamento exponencial e assintótico, como encontrados pela simulação e discutidos no capítulo 06. Com base nessa apresentação de dados, pode-se concluir que a simulação e o experimento apresentam o mesmo comportamento. Entretanto, por razões de operação, uma comparação qualitativa acabou por ficar comprometida.

8 ESTUDOS DE CASOS A PARTIR DA VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO

A solução apresentada pelo CFX está de acordo com o modelo teórico apresentado, assim, como o projeto IRIS ainda está em construção, pode-se fazer estudos de casos variando parâmetros da simulação com o objetivo de otimizar a homogeneização do ácido bórico no interior do pressurizador.

Para realizar este estudo foi utilizado o experimento “A” e “C” como referência, pois apresentam respectivamente uma configuração de 100% e 0% de potência. Foram realizadas simulações com as mesmas características físicas do experimento “A” e “C”, como mostrado na Tabela 19 no apêndice 01.

8.1 ALTERAÇÕES PARA O EXPERIMENTO “A”

Foram feitas alterações em dados da geometria do experimento e na vazão de entrada e saída, com objetivo de tentar entender que fatores podem alterar, facilitando ou dificultando, a homogeneização do ácido bórico no interior da seção de testes. Os resultados estão apresentados nesta seção de maneira detalhada em tópicos.

8.1.1 *Diâmetro de 1,5 cm*

Esta simulação foi feita nas mesmas condições de operação do experimento “A”, mas com diâmetro de entrada e saída alterados para 1,5 cm. A Figura 21 ilustra o comportamento da homogeneização do boro ao longo do tempo de 10 horas de simulação.

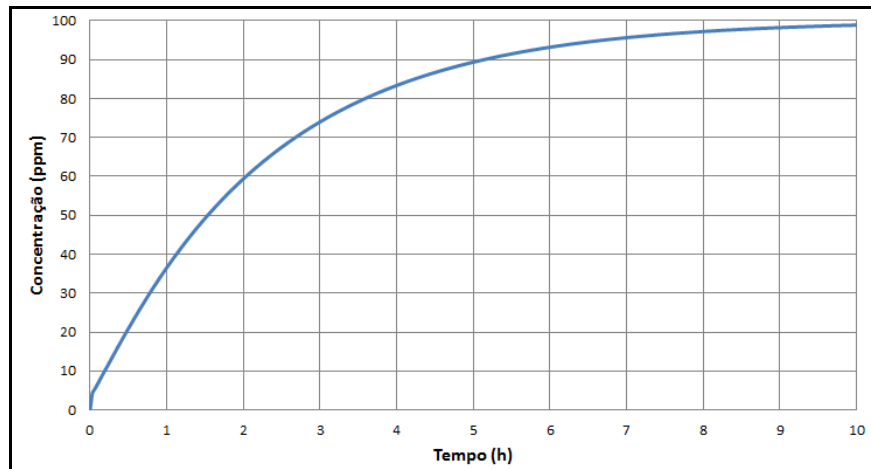


Figura 21: Gráfico da concentração de ácido bórico para D= 1,5 cm.

A Tabela 8 mostra os valores da concentração média para o diâmetro D = 1,5 cm, a cada hora e seu respectivo desvio em relação ao resultado da simulação para o diâmetro D = 1,0 cm.

Tabela 8: Valores da concentração média para D = 1,5 cm.

Tempo (h)	Conc(ppm) D=1,0 cm	Conc(ppm) D=1,5cm	Desvio Relativo (%)
0,0	0	0	-
1,0	37,2	36,5	7
2,0	58,8	59,4	1
3,0	73,0	74,0	1
4,0	82,3	83,4	1
5,0	88,4	89,3	1
6,0	92,4	93,2	1
7,0	95,0	95,6	1
8,0	96,7	97,2	0,5
9,0	98,0	98,2	0,4
10,0	98,5	98,8	0,3

8.1.2 Diâmetro 2,5 cm

A Figura 22 ilustra o comportamento da concentração média para simulação com diâmetro alterado para 2,5 cm.

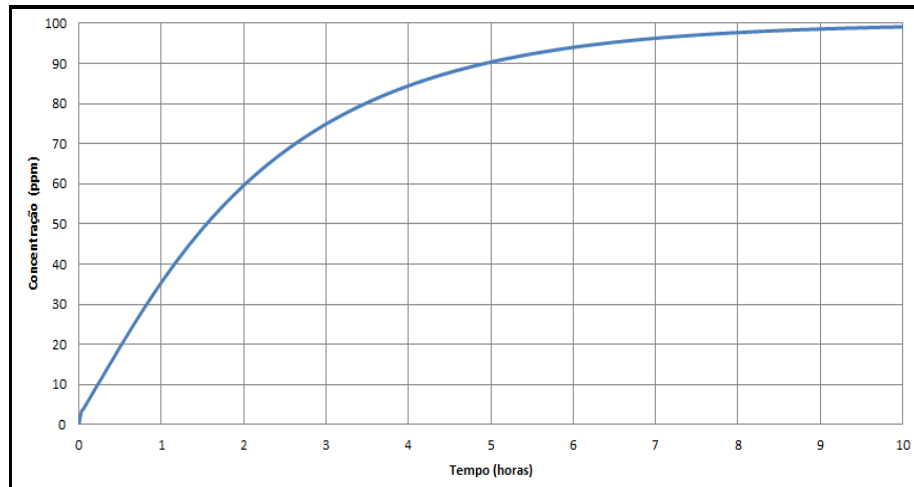


Figura 22: Gráfico da concentração para D= 2,5 cm

A Tabela 9 mostra os valores da concentração média a cada hora e seu respectivo desvio relativo em relação ao resultado da simulação para D = 1,0 cm.

Tabela 9: Valores da concentração média para D = 2,5 cm.

Tempo (h)	Conc(ppm) D=1,0 cm	Conc(ppm) D=2,5cm	Desvio Relativo (%)
0,0	0	0	-
1,0	37,2	35,4	5
2,0	58,8	59,6	1
3,0	73,0	74,9	3
4,0	82,3	84,4	3
5,0	88,4	90,3	2
6,0	92,4	94,0	2
7,0	95,0	96,3	1
8,0	96,7	97,7	1
9,0	98,0	98,6	1
10,0	98,5	99,1	0,5

8.1.3 Deslocamento da entrada

A Figura 23 ilustra o comportamento da concentração média em função do tempo. A entrada foi deslocada para 2 cm de distância em relação a parede da seção de testes e também foi mantido o diâmetro de 1 cm.

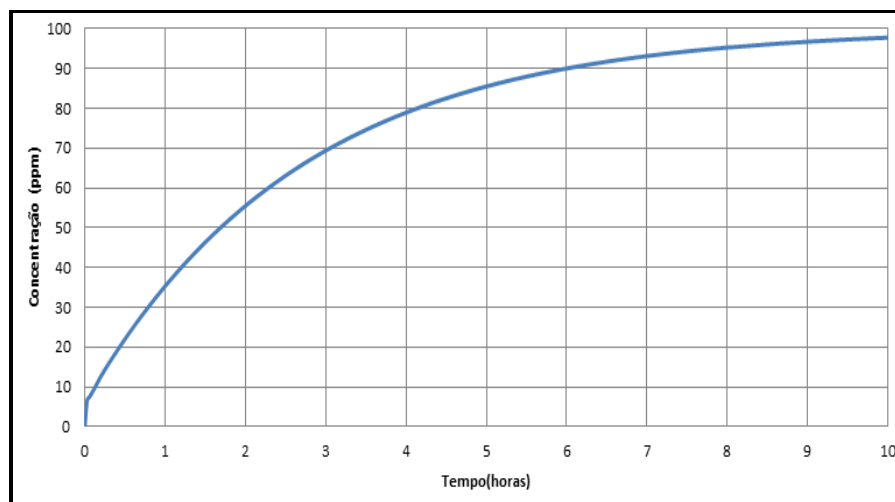


Figura 23: Gráfico da concentração para entrada deslocada.

A Tabela 10 ilustra os valores da concentração média a cada hora e seu respectivo desvio relativo em relação ao experimento “A”.

Tabela 10: Valores da concentração média para entrada deslocada.

Tempo (h)	Conc(ppm) D=1,0 cm	Conc(ppm) Entrada deslocada	Desvio Relativo (%)
0,0	0	0	-
1,0	37,2	35,3	5
2,0	58,8	55,5	6
3,0	73,0	69,4	5
4,0	82,3	78,9	4
5,0	88,4	85,5	3
6,0	92,4	90,0	3
7,0	95,0	93,1	2
8,0	96,7	95,3	1
9,0	98,0	96,7	1
10,0	98,5	97,7	1

8.1.4 Deslocamento da saída

A Figura 24 ilustra o comportamento da concentração média em função do tempo. A saída foi deslocada para 2 cm de distância em relação a parede da seção de testes e mantido o diâmetro de 1 cm.

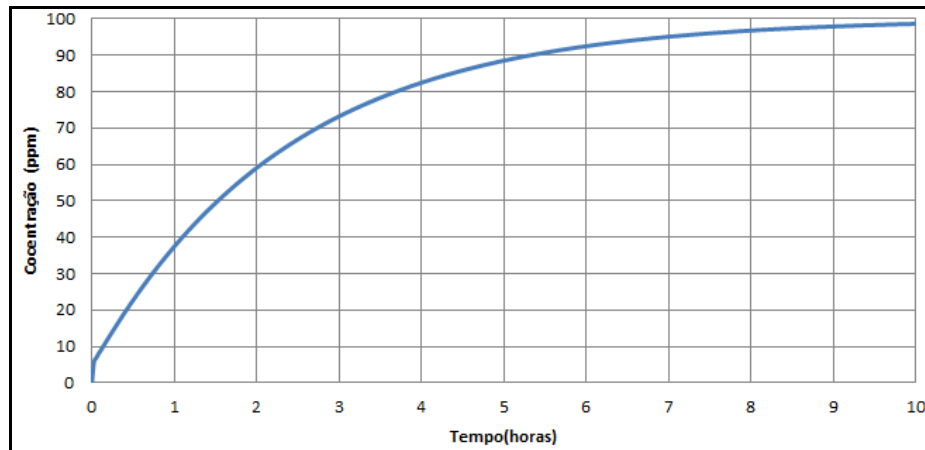


Figura 24: Gráfico de concentração para saída deslocada

A Tabela 11 mostra os valores da concentração média a cada hora e seu respectivo desvio relativo em relação ao experimento “A”.

Tabela 11: Valores da concentração média para saída deslocada.

Tempo (h)	Conc(ppm) D=1,0 cm	Conc(ppm) Saída deslocada	Desvio Relativo (%)
0,0	0	0	-
1,0	37,2	37,4	0,5
2,0	58,8	59,0	0,3
3,0	73,0	73,2	0,3
4,0	82,3	82,4	0,1
5,0	88,4	88,5	0,1
6,0	92,4	92,5	0,1
7,0	95,0	95,0	0
8,0	96,7	96,8	0,1
9,0	98,0	97,8	0,1
10,0	98,5	98,6	0,1

8.1.5 Deslocamento da entrada e saída

A Figura 25 ilustra o comportamento da concentração média em função do tempo. Nesta simulação a entrada e a saída foram deslocadas para 2 cm de distância em relação a parede da seção de testes.

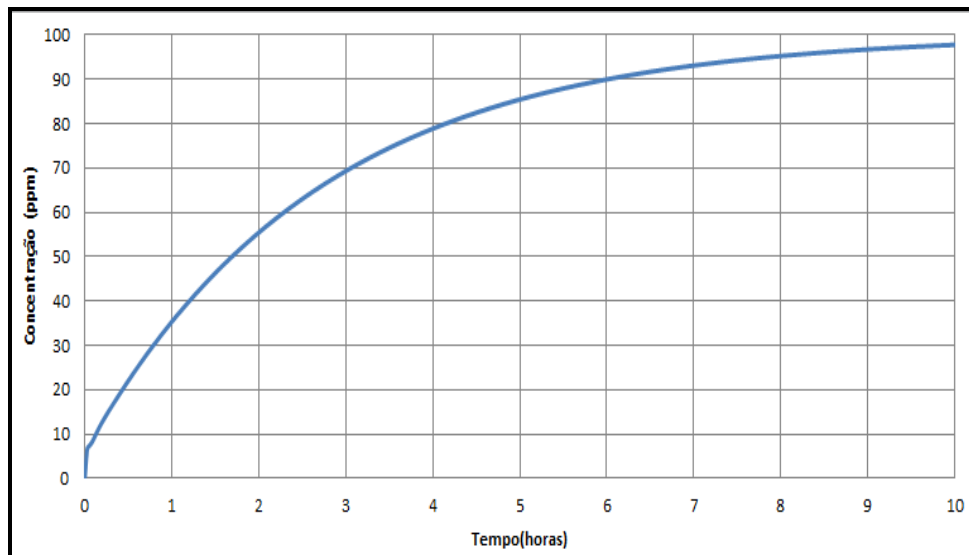


Figura 25: Gráfico para entrada e saída deslocadas

A Tabela 12 mostra os valores da concentração média a cada hora seu respectivo erro relativo em relação ao experimento “A”.

Tabela 12: Valores da concentração média para entrada e saída deslocadas.

Tempo (h)	Conc(ppm) D=1,0 cm	Conc(ppm) Entrada e saída deslocadas	Desvio Relativo (%)
0,0	0	0	-
1,0	37,2	35,3	5
2,0	58,8	55,4	6
3,0	73,0	69,3	5
4,0	82,3	78,9	4
5,0	88,4	85,4	3
6,0	92,4	89,9	3
7,0	95,0	93,1	2
8,0	96,7	95,2	2
9,0	98,0	96,7	1
10,0	98,5	97,7	1

8.1.6 Alteração da vazão para 30 L/h

Foi feita uma simulação colocando-se uma vazão alta, duas vezes o valor da vazão do experimento, para que se pudesse observar como a vazão influencia na homogeneização do boro. A Figura 26 ilustra o comportamento da concentração média na seção de testes em função do tempo de simulação.

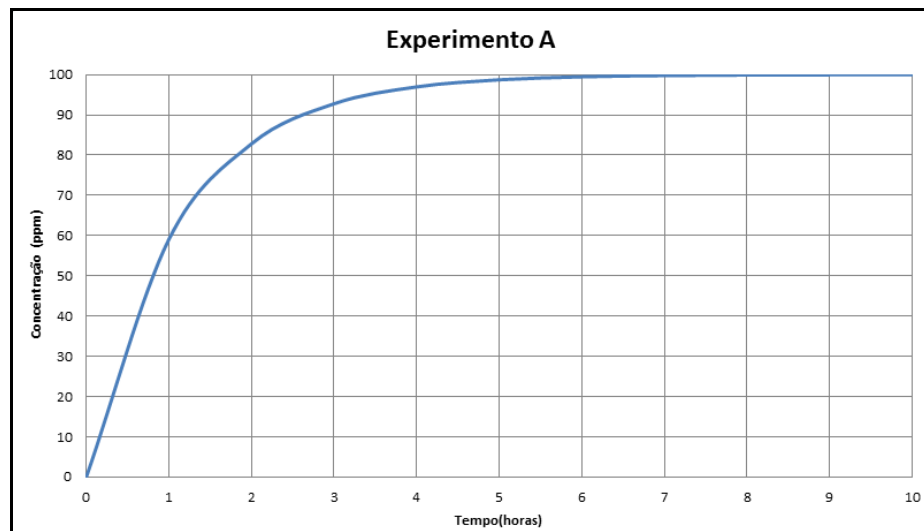


Figura 26: Comportamento da concentração para vazão de 30 L/h.

A Tabela 13 mostra os valores da concentração média a cada hora, para os valores da vazão de 15 L/h e 30 L/h, respectivamente e com o desvio relativo.

Tabela 13: Valores médios da concentração em ppm a cada hora.

Tempo (h)	Conc(ppm) Q=15L/h	Conc(ppm) Q= 30L/h	Desvio Relativo (%)
0,0	0	0	-
1,0	37,2	59,1	37
2,0	58,8	82,8	29
3,0	73,0	92,8	20
4,0	82,3	96,9	15
5,0	88,4	98,7	10
6,0	92,4	99,5	7
7,0	95,0	99,8	5
8,0	96,7	99,9	3
9,0	98,0	99,9	2
10,0	98,5	99,9	1

8.1.7 Alteração da vazão para 60 L/h

Nesta etapa, o objetivo é fazer uma análise da homogeneização do boro colocando-se uma vazão quatro vezes maior que a vazão utilizada no experimento.

A Figura 27 ilustra o comportamento da concentração média no interior da seção de testes.

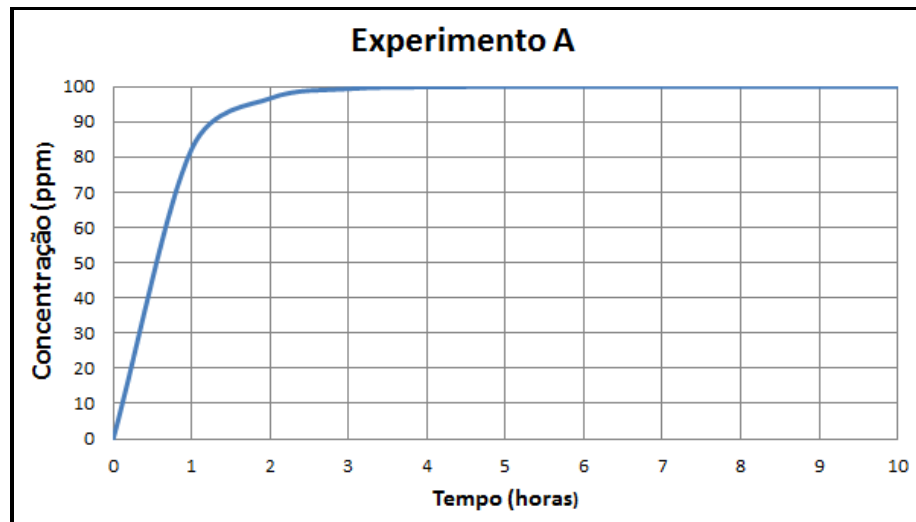


Figura 27: Comportamento da concentração para vazão de 60 L/h.

A Tabela 14 mostra os valores da concentração média a cada hora, para as vazões de 15 L/h e 60 L/h com seus respectivos desvios relativos.

Tabela 14: Valores médios da concentração em ppm a cada hora.

Tempo (h)	Conc(ppm) Q=15L/h	Conc(ppm) Q= 60L/h	Desvio Relativo (%)
0,0	0,0	0,0	-
1,0	37,2	82,3	54
2,0	58,8	96,7	39
3,0	73,0	99,4	27
4,0	82,3	99,8	18
5,0	88,4	99,9	11
6,0	92,4	99,9	8
7,0	95,0	99,9	5
8,0	96,7	99,9	3
9,0	98,0	99,9	2
10,0	98,5	99,9	1

Fazendo-se uma análise dos gráficos desta seção percebe-se que a homogeneização ocorre em todas as situações, mas o objetivo principal seria encontrar mecanismos que possam fornecer informações para que se tenha um projeto com funcionamento mais otimizado. Assim, os resultados acima se comparados com o resultado apresentado na seção 6.1, mostram que fatores como o aumento do diâmetro trouxe uma homogeneização mais rápida.

Adotando-se um valor de referência como sendo 10% a menos que a concentração de entrada, ou seja, 90 ppm observa-se uma melhor resposta do sistema para o diâmetro de 2,5 cm, antes de cinco horas. O diâmetro de 1,5 cm, que apresentou um tempo posterior também pode ser levado em consideração, pois levou cerca de 5,1 horas para atingir o mesmo patamar de homogeneização. Para todas as outras simulações como: variação das posições de entrada e saída não foram obtidos resultados significativos, pois só apresentaram o resultado encontrado pelo diâmetro de 2,5 cm após seis horas de simulação.

Como se pode perceber o fato da vazão ter aumentado também contribui de forma significativa para que o processo de homogeneização ocorra. O tempo médio para que a concentração média fosse superior a 90 ppm para vazão de 15 L/h foi superior a cinco horas, mas quando ocorreu um aumento da vazão para 30 L/h este processo levou em torno de três horas e cerca de duas horas para vazão de 60 L/h.

Outro fator importante foi o comportamento apresentado com o aumento da vazão, em ambos os casos a curva da concentração média manteve o mesmo padrão, porém com um comportamento assintótico mais rápido.

Assim, se torna importante também entender o que ocorre nesta etapa da homogeneização para o experimento “C”, considerando uma situação de 0% de potência, para analisar como esses fatores influenciam com o reator desligado, considerando apenas a variação do diâmetro de entrada e saída e variação da vazão, fatores estes que influenciaram no tempo de homogeneização.

8.2 ALTERAÇÕES PARA O EXPERIMENTO “C”

Os resultados apresentados abaixo descrevem como ocorre a homogeneização do ácido bórico em um transiente de dez horas para o experimento C variando o diâmetro de entrada e saída, mantendo-se as mesmas condições de operação e variando a vazão para o experimento com diâmetro de 1 cm.

8.2.1 Diâmetro de 1,5 cm

A Figura 28 ilustra o comportamento da concentração média na seção de testes em função do tempo.

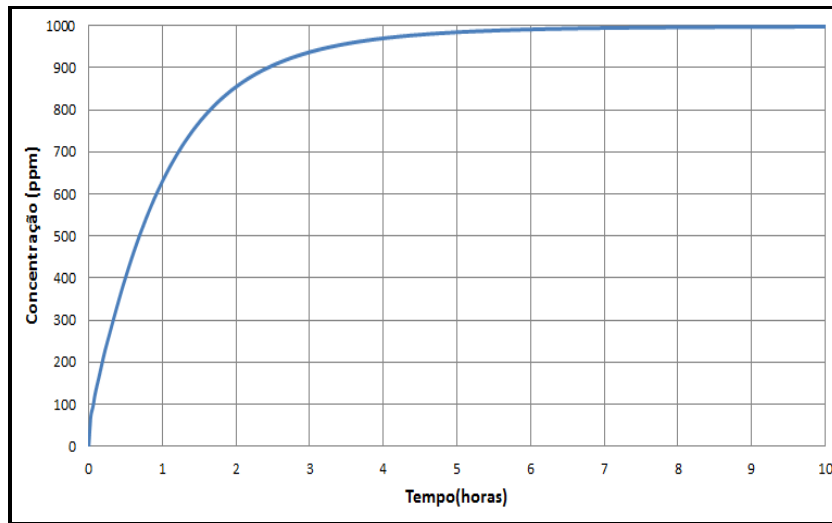


Figura 28: Gráfico do experimento “C” com $D = 1,5$ cm.

A Tabela 15 mostra os valores da concentração a cada hora e seu respectivo erro relativo em relação ao experimento “C”.

Tabela 15: Valores médios da concentração para $D=1,5$ cm.

Tempo (h)	Conc(ppm) D=1,0 cm	Conc(ppm) D=1,5 cm	Desvio relativo (%)
0,0	0,0	0,0	-
1,0	672,4	630,4	6
2,0	890,4	855,1	4
3,0	963,3	937,6	3
4,0	987,3	970,5	2
5,0	995,3	984,9	1
6,0	997,9	991,6	1
7,0	998,9	994,9	0,5
8,0	999,3	996,5	0,3
9,0	999,5	997,5	0,2
10,0	999,6	998,1	0,2

8.2.2 Diâmetro de 2,5 cm

A Figura 29 ilustra o comportamento da concentração média na seção de testes em função do tempo com diâmetro alterado para 2,5 cm.

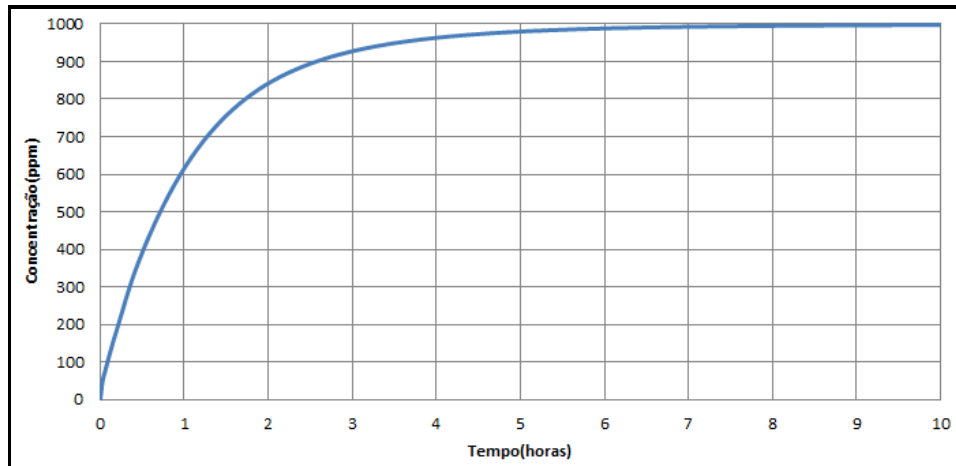


Figura 29: Gráfico do experimento C com $D = 2,5$ cm

A Tabela 16 mostra os valores da concentração média a cada hora e seu respectivo desvio relativo em relação ao experimento “C”.

Tabela 16: Valores médios da concentração para D=2,5 cm.

Tempo (h)	Conc(ppm) D=1,0 cm	Conc(ppm) D=2,5 cm	Desvio Relativo (%)
0,0	0,0	0,0	-
1,0	672,4	616,1	8
2,0	890,4	841,7	5
3,0	963,3	927,4	4
4,0	987,3	963,1	2
5,0	995,3	979,6	2
6,0	997,9	987,9	1
7,0	998,9	992,3	1
8,0	999,3	994,7	0,5
9,0	999,5	996,1	0,3
10,0	999,6	997,1	0,3

Utilizando o mesmo critério de referência 10% do valor da concentração de entrada e o fato do experimento “A” apresentar melhores resultados para o diâmetro de 2,5 cm, procuram-se evidências que possam unificar os diâmetros. A partir da análise dos gráficos e tabelas acima, percebe-se que a homogeneização ocorreu dentro de um mesmo padrão de tempo nos três casos, ficando mesmo o experimento “A” como referência para escolha de futuras alterações físicas na elaboração do projeto.

8.2.3 Alteração da vazão para 30 L/h.

Para o experimento “C” foi considerado um tempo de 5 horas, pois a partir deste intervalo fica bem claro que a homogeneização já ocorreu e os intervalos considerados serão a cada meia hora. A Figura 30 ilustra o gráfico da concentração de boro em função do tempo para vazão de 30 L/h.

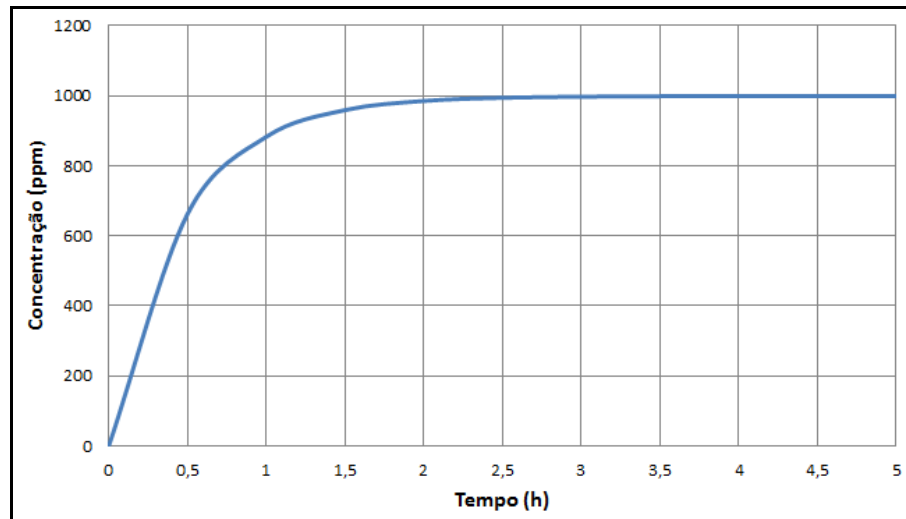


Figura 30: Gráfico da concentração x tempo para vazão de 30 L/h.

A Tabela 17 mostra os valores da concentração a cada meia hora para as vazões de 15 L/h e 30 L/h, com seu respectivo desvio relativos.

Tabela 17: Valores médios da concentração a cada meia hora.

Tempo (h)	Conc_CFX (ppm) 15 L/h	Conc_CFX (ppm) 30 L/h	Desvio Relativo (%)
0,0	0,0	0,0	-
0,5	436,1	662,4	34
1,0	672,4	882,6	24
1,5	810,4	958,9	15
2,0	890,4	985,1	10
2,5	936,6	994,2	6
3,0	963,3	997,3	3
3,5	978,5	998,5	2
4,0	987,3	999,1	1
4,5	992,3	999,2	1
5,0	995,2	999,4	1

8.2.4 Alteração da vazão para 60 L/h.

A Figura 31 ilustra o gráfico da concentração de boro em função do tempo para vazão de 30 L/h.

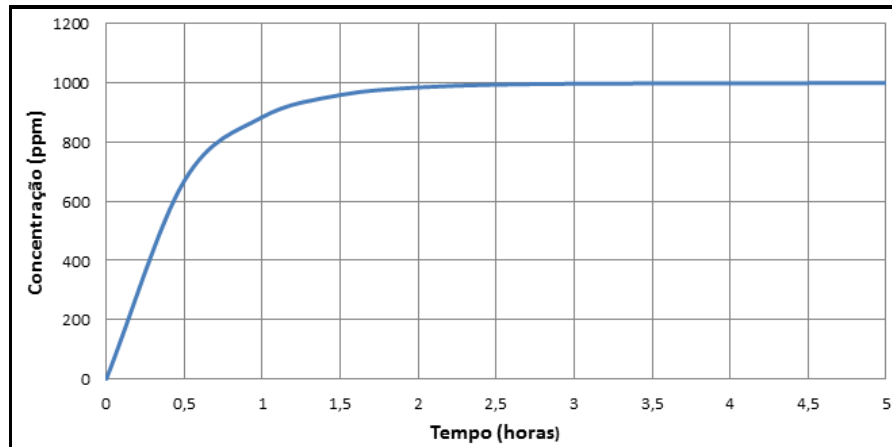


Figura 31: Gráfico da concentração x tempo para vazão de 60 L/h.

A Tabela 18 mostra os valores da concentração a cada meia hora para as vazões de 15 L/h e 60 L/h, com seu respectivo desvio relativos.

Tabela 18: Valores médios da concentração a cada meia hora.

Tempo (h)	Conc_CFX (ppm) 15 L/h	Conc_CFX (ppm) 60 L/h	Desvio Relativo (%)
0,0	0,0	0,0	-
0,5	436,1	669,1	35
1,0	672,4	884,6	24
1,5	810,4	959,4	16
2,0	890,4	985,2	10
2,5	936,6	994,2	6
3,0	963,3	997,4	3
3,5	978,5	998,6	2
4,0	987,3	999,1	1
4,5	992,3	999,3	1
5,0	995,2	999,5	1

Mantendo-se o mesmo raciocínio utilizado para fazer a análise do experimento “A”, adotando-se um valor de referência como sendo 10% a menos que a concentração de entrada, ou seja, 900 ppm observa-se que em ambos os casos o tempo de homogeneização ficou em torno de uma hora. O fato de não apresentar alterações para variação de vazão pode estar relacionado ao volume de água presente na seção de testes. Outro dado importante é que o comportamento da curva se manteve, mesmo aumentando a vazão em até quatro vezes.

9 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve como propósito analisar como a homogeneização do ácido bórico se comporta com o passar do tempo dentro da seção de testes, que simula $\frac{1}{4}$ do pressurizador de um reator modular, através de simulações computacionais utilizando o Ansys CFX.

Os resultados apresentados pelo CFX possuem grande coerência com os resultados teóricos, uma vez que a solução analítica leva em consideração somente a solução da equação ignorando dados geométricos do problema. Fato este, sendo percebido nas diferenças de concentração máxima apresentada pelo modelo e pela simulação.

O comportamento da curva para os experimentos “A”, “B” e “C” mostra que os resultados encontrados pela simulação apresentam coerência do ponto de vista qualitativo e quantitativo, pois o intervalo de tempo para que a condição de homogeneização acontecesse ficou em torno de 5 horas para os experimentos “A” e “B” em torno de 2 horas para o experimento “C”.

Analisando os resultados apresentados no capítulo 07, pode-se perceber que o comportamento da curva é similar, apresentando diferenças quantitativas relativas ao tempo de homogeneização. Este fato pode estar relacionado ao tratamento de dados feito pelo autor que possui influências externas como a luminosidade do ambiente. Quanto ao comportamento qualitativo da curva pode-se perceber que as curvas apresentam coerência entre os resultados experimentais e simulados.

Em relação aos estudos de casos referentes ao experimento “A”, pode-se concluir que fatores como mudança de posição da entrada e saída não trazem alterações no comportamento da curva de concentração ao longo do tempo. A alteração da vazão para valores mais altos apresentam um tempo menor para que

acorra a homogeneização, fato este, que já era esperado, mas pode ser útil para estudos futuros, pois o aumento da vazão em até quatro vezes do valor nominal não alterou o comportamento da curva. Fatores como o aumento do diâmetro pode ser considerado um dado importante, pois o aumento do diâmetro de entrada e saída para 2,5 cm apresentou um ganho de tempo em relação à homogeneização do boro.

Para o experimento "C" foi analisado fatores que influenciaram o tempo de homogeneização no experimento A, observa-se que o aumento do diâmetro de entrada e saída não apresentaram mudanças em relação ao experimento original com 1 cm de diâmetro. O aumento da vazão reduziu o tempo de homogeneização para 1 hora, como era esperado, mas um dado importante é que o comportamento da curva se manteve para vazões mais altas. Lembrando que o valor da vazão é um dado de projeto para alterar este valor na prática seria alterar as definições de projeto, assim, o objetivo deste estudo era apenas verificar como este parâmetro pode influenciar na homogeneização do boro.

Como consequência dos fatos apresentados, pode-se considerar em trabalhos futuros variações do diâmetro de entrada e saída, utilizando a bancada experimental e tentar uma técnica que consiga valores da concentração em ppm para que se possa fazer uma comparação qualitativa e quantitativa entre os dados simulados, experimentais e teóricos.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAPTISTA FILHO, B.D.; CEGALLA, M.; RADUAN, R.N.; BARROSO, A.C.O.; LIMA, F.R.A.; LIRA, C.A.B.O.; LIMA, R.C.F. Um projeto para avaliação sócio-econômica e ambiental do uso da energia nuclear e do gás natural como opções para o desenvolvimento sustentável do semi-árido brasileiro. In: INAC 2005, Santos, Brasil, 2005.

BARROSO, A.C.O.; BAPTISTA FILHO, B.D.; ARONE, I.D.; MACEDO, L.A.; SAMPAIO, P.A.B.; ORAES, M. IRIS Pressurizer Design. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONGRESS ON ADVANCES IN NUCLEAR POWER PLANTS ICAPP'03. Cordoba, Spain, 2003.

BARROSO, A.C.O.; BAPTISTA FILHO, B.D. Refining the design and analysis of the IRIS PRESSURIZER. In: 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR OPTION IN COUNTRIES WITH SMALL AND MEDIUM ELECTRICITY GRIDS. Dubrovnik, Croatia, 2004.

BEZERRA, JAIR DE LIMA. Estudo do processo de homogeneização do boro em uma bancada experimental de baixa pressão simulando o pressurizador do reator IRIS / Jair de Lima Bezerra – Recife: O Autor, 2012. 117f., il., figs., gráfs., tabs.

BOTELHO, D. A.; SAMPAIO, P.A.B., LAPA, C.M.F.; PEREIRA, C.M.N.A. Optimization Procedure to Design Pressurizer Experiments. In: INAC 2005. Santos, Brasil, 2005a.

CARELLI, M.D. IRIS – International Reactor Innovative and Secure. Final Technical Report – DOE Report Number: Std-Es-03-40, 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 Design, 2004. v.230, p.151-167.

CATRAKIS, H.J.; DIMOTAKIS, P.E. Mixing in turbulent jets: scalar measures and isosurface geometry. Journal of Fluid Mechanics, 1996, v.317, p.369-406.

DUDERSTADT, J. J.; HAMILTON, L. J. Nuclear Reactor Analysis. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1976.

ELETRONUCLEAR, Apostila de Treinamento – Sistema de Controle Químico e Volumétrico CQV – Módulo I. 1999b.

ELETRONUCLEAR, Apostila de Treinamento – Sistema de Refrigeração do Reator SRR-I. 1999a.

GAVRILAS, M; PALAZOV, V. A scaling approach for fluid mixing in rapid boron-dilution transients. In: 7th International Conference on Nuclear Engineering, Tokyo, Japan, 1999 – ICONE-7223.

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

LAMARSH, J. R.; BARATTA, A. J. Introduction to Nuclear Engineering. 3^a. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

PERONA, J.J.; HYLTON, T.D.; YOUNGBLOOD, E.L.; CUMMINS, R.L. Jet mixing of liquids in long horizontal cylindrical tanks. Ind. Eng. Chem. Res., 1998, v.37, p.1478-1482.

SILVA, M. A. B. Determinação dos Parâmetros de uma Seção de Testes para o Pressurizador do Reator Nuclear IRIS. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Energia Nuclear, 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*, v37, p. 1415-1419, 2010.

TODREAS, N. E.; KAZIMI, M. S. *Nuclear Systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals*. New York: Taylor & Francis Group, 1990.

ZUBER, N.; WULFF, W.; ROHATGI, U.S.; CATTON, I.; Application of Fractional Scaling analysis (FSA) to Loss of Coolant Accidents (LOCA) – Part 1. Methodology Development. In: *The 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-11)*, Avignon, France, 2005.

WENRAN, W.; YUEYUAN, J.; LIN, L.; YALI, W. A novel encoding water level monitor system during and after LOCAs in a nuclear heating reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 1998, v.179, p.275-280.

WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LCC. IRIS Plant Description Document. Westinghouse Proprietary Class 2 - WCAP-16062-P. Mar. 21, Pittsburgh, 2003a.

WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LCC. IRIS plant description document. Westinghouse Proprietary Class 2 - WCAP-16062-P. Mar. 21, 2003b. Pittsburgh.

WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LCC . Final Technical Progress Report – STD - ES-03-40. Nov. 3, Pittsburgh, 2003c.

WULFF, W.; ZUBER, N.; ROHATGI, U.S.; CATTON, I.; Application of Fractional Scaling Analysis (FSA) to Loss of Coolant Accidents (LOCA) – Part 2. System Level Scaling for System Depressurization. In: *The 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-11)*, Avignon, France, 2005.

Apêndice A

Descrição do experimento base

A Figura 32 representa o fluxograma da bancada experimental utilizada nos experimentos. Sua montagem baseou-se no estudo desenvolvido por (SILVA et al., 2010).

A bancada simplificada consta de dois tanques com volume de 200 litros cada um, onde ocorrem os processos de diluição e boração, uma bomba dosadora, um frequencímetro, dois rotômetros para medição da vazão, válvulas de precisão em aço inox, válvulas esfera de latão, conexões e tubulação com diâmetro interno de 3/8", em aço inox.

A seção de testes, que representa $\frac{1}{4}$ do pressurizador do IRIS, foi construída em acrílico transparente de 20 mm de espessura nas bases maior e menor dos cilindros, e as paredes laterais em acrílico transparente de 10 mm de espessura.

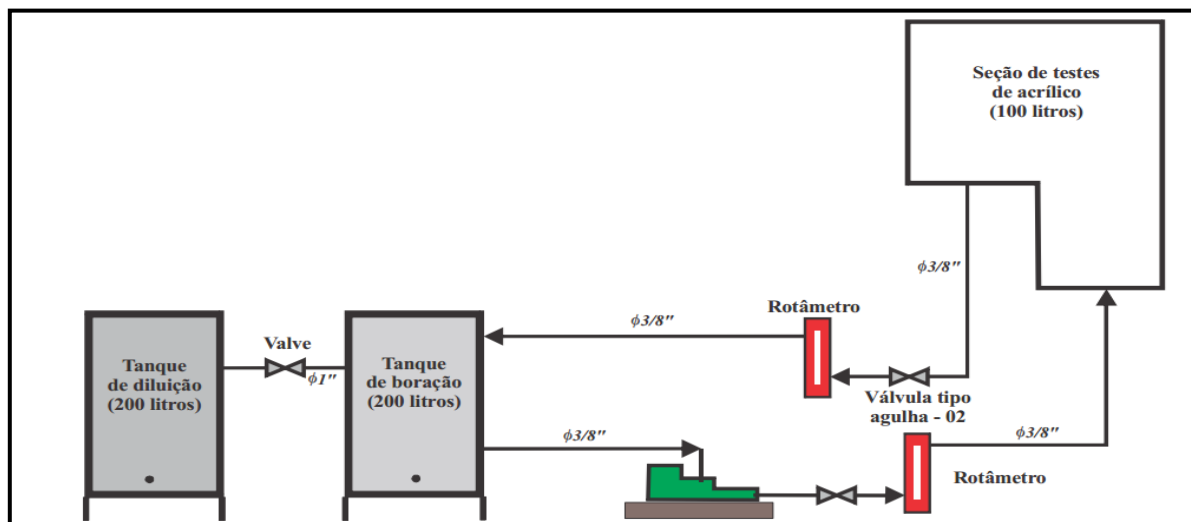


Figura 32: Fluxograma da bancada experimental

Foram realizados três experimentos, denominados experimentos A, B e C que terão seus dados descritos na Tabela 19.

Tabela 19: Dados experimentais

Experimento A				
Potência (%)	Concentração (ppm)	Volume da ST (L)	Volume TB (L)	Diâmetro do furo (mm)
100	100	40,5	100	10
Experimento B				
Potência (%)	Concentração (ppm)	Volume da ST (L)	Volume TB (L)	Diâmetro do furo (mm)
20	400	40,4	100	10
Experimento C				
Potência (%)	Concentração (ppm)	Volume da ST (L)	Volume TB (L)	Diâmetro do furo (mm)
0	1000	17	100	10

Para realização do experimento foi utilizado um corante com as mesmas características do Boro. Os resultados experimentais preliminares foram obtidos através de vídeos e fotografias digitais da Seção de Testes (ST) durante o processo de homogeneização do corante. O registro das imagens da evolução da pluma do corante na ST foi tomado a cada 30 minutos, durante aproximadamente 5 horas, quando já se tinha visualmente uma indicação da homogeneização do corante no sistema.

O modelo teórico que descreve os experimentos simulados na bancada experimental (NARAIN, 2012), é descrito pelas equações:

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = Q[C_2 - C_1] \quad (\text{A.1})$$

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = Q[C_1 - C_2] \quad (\text{A.2})$$

onde V_1 e C_1 representam, respectivamente, o volume e a concentração na seção de testes, V_2 e C_2 representam, respectivamente, o volume e a concentração no tanque de boração e Q a vazão de entrada e saída da seção de testes.

A solução do sistema apresentado pelas equações (A.1) e (A.2) é:

$$C_1 = C_2(0) \left(\frac{T_2}{T_1 + T_2} \right) \left[1 - e^{-\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)t} \right] \quad (\text{A-2})$$

$$C_2 = C_2(0) \left[\left(\frac{T_2}{T_1 + T_2} \right) + \left(\frac{T_1}{T_1 + T_2} \right) e^{-\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)t} \right] \quad (\text{A-4})$$

onde: $T_1 = \frac{V_1}{Q}$ e $T_2 = \frac{V_2}{Q}$