

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS  
ENERGÉTICAS E NUCLEARES (PROTEN)

MARDSON ALENCAR DE SÁ MAGALHÃES

**EFEITOS DE TRANSITÓRIOS DE BORO NO  
COMPORTAMENTO DO REATOR IRIS ATRAVÉS DE  
MODELAGEM DINÂMICA COM SIMULINK**

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

DEZEMBRO – 2010

**EFEITOS DE TRANSITÓRIOS DE BORO NO  
COMPORTAMENTO DO REATOR IRIS ATRAVÉS DE  
MODELAGEM DINÂMICA COM SIMULINK**

MARDSON ALENCAR DE SÁ MAGALHÃES

**EFEITOS DE TRANSITÓRIOS DE BORO NO  
COMPORTAMENTO DO REATOR IRIS ATRAVÉS DE  
MODELAGEM DINÂMICA COM SIMULINK**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, do Departamento de Energia Nuclear, da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de Reatores.

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

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Mário Augusto Bezerra da Silva

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

DEZEMBRO – 2010

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Marcos Aurélio Soares da Silva, CRB-4 / 1175

M188e Magalhães, Mardson Alencar de Sá.  
Efeitos de transitórios de boro no comportamento do reator IRIS através de modelagem dinâmica com simulink / Mardson Alencar de Sá Magalhães. - Recife: O Autor, 2010.  
164 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e nucleares, 2010.  
Inclui Referências, Anexos e Apêndices.

1. Engenharia de Reatores. 2.Boro. 3. Reator IRIS. 4.Simulação Dinâmica. 5.Transitório. I.Lira, Carlos Alberto Brayner de Oliveira.(Orientador). II. Título.

621.483 CDD (22. ed.)

UFPE

BCTG/2011-091

**EFEITOS DE TRANSITÓRIOS DE BORO NO  
COMPORTAMENTO DO REATOR IRIS ATRAVÉS DE  
MODELAGEM DINÂMICA COM SIMULINK**

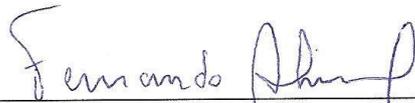
**Mardson Alencar de Sá Magalhães**

**APROVADO EM: 23.12.2010**

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

**CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Mário Augusto Bezerra da Silva**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



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

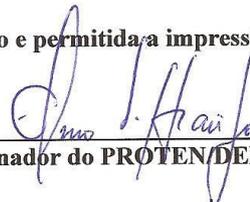


**Prof. Dr. Rajendra Narain – DEN/UFPE**



**Prof. Dr. Pedro Anselmo Filho – DEMEC/UPE**

**Visto e permitida a impressão**



**Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE**

Dedico essa dissertação à minha esposa, Macilene Nazário, à minha família e amigos, pelo apoio incondicional, pela compreensão irrestrita e o incentivo constante nos diversos momentos e situações inerentes ao desenvolvimento desse trabalho e que exigiram, muitas vezes, que me furtasse dos seus convívios.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria, primeiramente, de agradecer a Deus por tudo que tem proporcionado em minha vida.

Aos professores Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira (DEN – UFPE) e Mário Augusto Bezerra da Silva (DEN – UFPE), pela orientação segura que a mim dedicaram e por terem sempre me apoiado nos momentos mais cruciais do trabalho.

Ao professor Fernando Roberto de Andrade Lima (CRCN-NE – CNEN), que acompanhou desde o início o desenvolvimento do trabalho, fazendo parte das bancas examinadoras dos dois seminários e da defesa de dissertação.

Ao professor Pedro Anselmo Filho (DEMEC – UPE) pela participação na banca examinadora da defesa de dissertação.

Ao professor Rajendra Narain (DEN – UFPE) por ter participado das bancas examinadoras da defesa de dissertação e do 1º seminário de dissertação.

Às professoras Rita de Cássia Fernandes de Lima (DEMEC – UFPE) e Lázara Silveira Castrillo (DEMEC – UPE), pela participação da banca examinadora do 2º seminário de dissertação.

Ao professor Elias Silva Filho (DEN – UFPE) pela participação na banca examinadora do 1º seminário de dissertação.

Ao professor Carlos Costa Dantas (DEN – UFPE), pela paciência, e pela colaboração irrestrita, permitindo, inúmeras vezes, que utilizássemos o seu laboratório computacional.

Ao amigo Jair de Lima Bezerra, pelo incentivo e pelas informações valiosas que compartilhou conosco e que foram, sem dúvida alguma, decisivas para a conclusão do trabalho.

Ao meu generoso e bom amigo Wagner Eustáquio, pelo imenso apoio nos momentos de diversidade pelos quais passei e pelas discussões sobre Lógica Fuzzy, Algoritmos Genéticos e Redes Neurais Artificiais.

Aos novos amigos que fiz e os velhos amigos que re-encontrei no DEN, pelas boas horas de convívio e pelo incentivo para vencer as dificuldades inerentes à dissertação.

À Magali, por tratar das questões burocráticas da Pós-Graduação de maneira eficiente e a todos que fazem o DEN, por nunca estarem indisponíveis.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro ao desenvolvimento dessa pesquisa.

***“Pedras no caminho? Guardo todas,  
um dia vou construir um castelo...”***

**Fernando Pessoa**

# EFEITOS DE TRANSITÓRIOS DE BORO NO COMPORTAMENTO DO REATOR IRIS ATRAVÉS DE MODELAGEM DINÂMICA COM SIMULINK

**Autor: Mardson Alencar de Sá Magalhães**

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

Co-orientador: Prof. Dr. Mário Augusto Bezerra da Silva

## RESUMO

Nos últimos anos, a crescente demanda por fontes renováveis de energia que atendam ao novo paradigma de desenvolvimento sustentável tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de um espectro mais amplo de fontes alternativas de energia. Diante disso, a energia nuclear ressurgiu como uma das opções mais viáveis e estes aspectos se refletem nos requisitos de segurança de centrais nucleares.

Assim, com a experiência adquirida em mais de 40 anos no desenvolvimento de reatores PWR (*Pressurized Water Reactor*), a Companhia *Westinghouse*, em uma parceria internacional com centros de pesquisa e indústrias em 10 países, desenvolve o projeto de um reator nuclear a água leve com configuração integral, modular e de média potência conhecido como IRIS (*International Reactor Innovative and Secure*). Uma das principais características do reator IRIS é que a maior parte de seus componentes encontra-se no interior do vaso de pressão, reduzindo a probabilidade de acidentes.

Em reatores a água leve, uma solução de ácido bórico é utilizada no refrigerante do circuito primário para absorver nêutrons com a finalidade de ajustar a reatividade do reator. Uma variação significativa na concentração de boro no núcleo do reator pode levar a uma variação considerável de potência.

Vários estudos envolvendo reatores PWR apontam cenários que podem conduzir o reator a excursões de potência devido a deficiências da homogeneização do ácido bórico diluído no refrigerante.

O reator IRIS, devido a sua configuração integral, não possui um sistema de

aspersão para homogeneização de boro, o que pode causar transitórios de potência.

O presente trabalho tem como objetivo o estudo e desenvolvimento de um modelo dinâmico para o reator IRIS, implementado no programa SIMULINK do MATLAB, para simular os transitórios de potência devidos às variações de concentração de boro no circuito primário do reator IRIS.

A metodologia compreendeu o desenvolvimento de um conjunto de equações diferenciais de balanço neutrônico e termoidrúlico que descrevem a dinâmica do circuito primário e um conjunto de equações diferenciais que descrevem o balanço termoidrúlico do circuito secundário. As equações e os parâmetros de inicialização a plena potência foram implementados no SIMULINK, e o código foi validado com um transitório de redução de entrada de água nos geradores de vapor realizado com o código RELAP. Em seguida, um modelo homogêneo de variação da concentração de ácido bórico foi implementado no programa e os casos de interesse simulados.

Os resultados encontrados para transitórios operacionais de boração e deboração se mostraram confiáveis e representaram o comportamento esperado para as grandezas analisadas.

O código MODIRIS desenvolvido em SIMULINK se mostrou muito eficiente nos processos com constantes de tempo próximas, ao passo que em processos com constantes de tempo com muitas ordens de grandeza de diferença o desempenho do código se mostrou fortemente dependente da máquina, o que representa uma pequena desvantagem.

Palavras-chave: Boro, IRIS, Simulação Dinâmica, Transitórios

# **BORON TRANSIENT EFFECTS ON THE BEHAVIOR OF IRIS REACTOR USING DYNAMIC MODELING WITH SIMULINK**

**Author: Mardson Alencar de Sá Magalhães**

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

Coadviser: Prof. Dr. Mário Augusto Bezerra da Silva

## **ABSTRACT**

Recently, the growing demand for renewable energy sources required by the needs of sustainable development has been boosting researches and, as a result, the development of a broader range of alternative energy sources. In this context, nuclear power returns as one of the most feasible options, as evidenced by power plant security requirements.

Thus, with experience obtained over more than forty years of development on PWR (*Pressurized Water Reactor*) reactors, the Westinghouse Company, in an international partnership with research centers and industries among ten countries, has been developing the project of a modular nuclear light water reactor with integral configuration of average power, known as IRIS (*International Reactor Innovative and Secure*). One of the main features of the IRIS is that most of its components are found within the pressure vessel, a security measure adopted to reduce accident risks.

In light water reactors, a solution of boric acid is used in the coolant of the primary loop to absorb neutrons, aiming to adjusting the reactivity of the reactor. A significant variation in the concentration of boron in the nucleus may lead to a considerable power variation.

Several studies on PWR found correlations between power excursions and deficiencies in homogenization of boric acid diluted in the coolant.

The IRIS reactor, due to its integral configuration, does not possess an aspersion system for boron homogenization which may cause power transients.

The current work looks for studying and developing a dynamic model for the IRIS reactor implemented in the MATLAB'S software SIMULINK, to simulate power transients which occur due to variations in the concentration of boron in the primary loop of the IRIS reactor.

The methodology is based on developing a set of differential equations of neutronic and thermohydraulic balance which describes the dynamics of the primary circuit, as well as a set of differential equations describing the dynamics of secondary circuit. The equations and parameters of initialization at full power were inserted into the SIMULINK and the code was validated with a transient of feed water reduction in the steam generators accomplished with the RELAP code. Next, a homogeneous model of variation in the concentration of boric acid was implemented into the software, where cases of interest were simulated.

The results which were found for operational transients of boration and deboration showed themselves reliable and represented the expected behavior for the analyzed magnitude.

The code MODIRIS developed in SIMULINK has shown to be very efficient in the processes, with very close constants of time; whereas, for processes with many orders of magnitude in difference, the performance of the code appeared to be greatly machine dependent, which represents a small disadvantage.

Keywords: Boron, IRIS, Dynamic Simulation, Transients

## Lista de Figuras

	<b>Página</b>
Figura 1 – Secção longitudinal reta de um PWR convencional (LAMARSH,1975).....	25
Figura 2 – Vista seccional do vaso de pressão do reator IRIS.....	40
Figura 3 – Vista do interior do vaso de contenção do IRIS.....	41
Figura 4 – As variáveis de estado de um sistema dinâmico.....	51
Figura 5 – Elementos de um modelo em SIMULINK.....	56
Figura 6 – Limite de solubilidade de soluções de ácido bórico (SANTOS,1999).....	68
Figura 7 – Visão esquemática dos sistemas de segurança do IRIS.....	73
Figura 8 – Benchmark pelo Instituto Politécnico de Milão.....	86
Figura 9 – Superposição das simulações realizadas com os três códigos.....	87
Figura 10 – Concentração de ácido bórico no primário do IRIS para uma deborção.....	94
Figura 11 – Reatividade devido ao ácido bórico em uma deborção para o IRIS.....	95
Figura 12 – Potência térmica gerada em uma deborção para o IRIS.....	96
Figura 13 – Temperatura média do combustível no reator IRIS (deborção).....	97
Figura 14 – Temperatura média do refrigerante que atravessa o núcleo do reator.....	98
Figura 15 – Reatividade devido ao combustível em uma deborção no reator IRIS.....	99
Figura 16 – Reatividade devido ao moderador em uma deborção no reator IRIS.....	100
Figura 17 – Reatividade total em uma deborção para o IRIS.....	102
Figura 18 – Densidade linear de potência térmica transferida do circuito primário.....	103
Figura 19 – Temperatura de saída do vapor superaquecido dos GV do IRIS.....	104
Figura 20 – Título termodinâmico do vapor superaquecido na saída dos GV do IRIS.....	105
Figura 21 – Concentração de ácido bórico no primário do IRIS para uma borção.....	106
Figura 22 – Reatividade devido ao ácido bórico em uma borção para o IRIS .....	107
Figura 23 – Potência térmica gerada em uma borção para o IRIS.....	108
Figura 24 – Temperatura média do combustível no reator IRIS (borção).....	109
Figura 25 – Temperatura média do refrigerante que atravessa o núcleo do reator.....	110
Figura 26 – Reatividade devido ao combustível em uma borção no reator IRIS.....	111
Figura 27 – Reatividade devido ao moderador em uma borção no reator IRIS.....	112
Figura 28 – Reatividade total em uma borção para o IRIS.....	114
Figura 29 – Densidade linear de potência térmica transferida do circuito primário .....	115
Figura 30 – Temperatura de saída do vapor superaquecido dos GV do IRIS.....	116
Figura 31 – Título termodinâmico do vapor superaquecido na saída dos GV do IRIS.....	117

## LISTA DE TABELAS

	<b>Página</b>
Tabela 1 – Organizações-membro do consórcio IRIS.....	37
Tabela 2 – Alguns parâmetros do projeto IRIS.....	90
Tabela 3 – Operações de boração e deboração e respectivas concentrações.....	91

## LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas		Unidade
<i>A</i>	Área da secção reta da taxa de fluxo no secundário do gerador de vapor ou uma área em geral	$m^2$
<i>C</i>	Concentração dos precursores de nêutrons atrasados	átomos/ $m^3$
<i>c</i>	Calor específico	kJ/(kg K)
<i>G</i>	Energia liberada por fissão nuclear	Mev
<i>h</i>	Entalpia específica do fluido	kJ/kg
<i>H</i>	Altura das barras de combustível	m
<i>m</i>	Massa	kg
<i>L</i>	Altura da região considerada no secundário dos geradores de vapor	m
<i>M</i>	Massa de água do primário	kg
<i>n</i>	Densidade de nêutrons	nêutrons/ $m^3$
<i>N</i>	Número total de barras de combustível no núcleo	
<i>p</i>	Pressão no lado secundário	bar
<i>P</i>	Potência térmica instantânea do núcleo	kW
<i>q</i>	Potência térmica gerada	MW
<i>Q</i>	Vazão mássica da bomba	kg/s
<i>r</i>	Reatividade total	pcm
<i>T</i>	Temperatura média	°C
<i>u</i>	Coeficiente de transferência de calor convectiva	kW/( $m^2$ °C)
<i>V</i>	Volume de água do circuito primário	$m^3$
<i>x</i>	Título termodinâmico	adimensional
<i>w</i>	Vazão mássica entrando no primário e dele saindo	kg/s
<i>W</i>	Potência térmica trocada entre o primário e o secundário dos geradores de vapor	kW

$z$	Cota	m
-----	------	---

### Letras Gregas

$\alpha$	Coeficiente de reatividade	
$\beta$	Fração total de nêutrons atrasados	adimensional
$\chi$	Fração de vazio	adimensional
$\lambda$	Constante de decaimento dos precursores de nêutrons atrasados.	$s^{-1}$
$\Lambda$	Tempo médio de geração entre o nascimento de nêutrons e a subsequente absorção induzindo fissão.	s
$\phi$	Vazão volumétrica	$m^3/s$
$\kappa$	Concentração de boro	ppm
$\rho$	Densidade do fluido	$kg/m^3$
$\xi$	Altura de inserção das barras de controle	m
$\tau$	Tempo característico de bomba	s

### Sobrescritos

—	Valor médio
.	Derivada em relação ao tempo
'''	Por unidade de volume

### Subscritos

$B$	Boro
$c$	Moderador ou refrigerante
$co$	Core (núcleo)
$E$	Tanque externo

<i>ex</i>	Saída do núcleo
<i>f</i>	Combustível
<i>in</i>	Entrada da região subresfriada
<i>l</i>	Entrada da região bifásica, ou líquido saturado
<i>o</i>	Plenum superior
<i>out</i>	Saída da região superaquecida
<i>p</i>	Circuito primário
<i>s</i>	Seção reta
<i>sat</i>	Saturação
<i>SGI</i>	Entrada de água do primário dos geradores de vapor
<i>SGO</i>	Saída da água do primário dos geradores de vapor
<i>t</i>	total
<i>T</i>	Tanques de boração ou deboração
<i>v</i>	Entrada da região superaquecida ou vapor saturado
$\zeta$	Barras de controle
<i>w</i>	Fluido no lado primário dos geradores de vapor
0	Referência ou inicial
1	Região subresfriada
2	Região bifásica
3	Região superaquecida

## LISTA DE SIGLAS

<b>Sigla</b>	<b>Significado</b>
ABWR	Advanced Boiling Water Reactor
ACR-700	Advanced CANDU Reactor 700
AMEBA	Alta Moderazione e Basso Arricchimento
APWR	Advanced Pressurized Water Reactor
APWR+	Advanced Pressurized Water Reactor Plus
AP600	Advanced Pressurized Water Reactor 600
AP1000	Advanced Pressurized Water Reactor 1000
APR1400	Advanced Power Reactor 1400
BWR	Boiling Water Reactor
BIS	Bombas de Injeção de Segurança
BRIB	Bombas de Recirculação de Injeção de Boro
BSRCR	Bombas do Sistema de Remoção de Calor Residual
CANDU	Canada Deuterium Uranium
CAREM	Central Argentina de Elementos Modulares
CFD	Computational Fluid Dynamics
CVCS	Chemical and Volume Control Systems
DOE	U. S. Department of Energy
DVI	Direct Vessel Injection
Dymola	Dynamic Modeling Laboratory
EBS	Emergence Boration System
EBT	Emergence Boration Tank
EC	Envoltório de Contenção

ECCS	Emergency Core Cooling System
EHRS	Emergency Heat Removal System
EPR	European Pressurized Reactor
ESBWR	Economic Simplified Boiling Water Reactor
GIF	Generation IV International Forum
GT-MHR	Gas Turbine-Modular Helium Reactor
GV	Gerador de Vapor
IMR	International Modular Reactor
INET	Institute of Nuclear and New Energy Technology
IRIS	International Reactor Innovative and Secure
KEPCO	Korea Electric Power Corporation
KNGR	Korean Next Generation Reactor
LOCA	Loss-of-coolant accident
LTR	Low Temperature Nuclear Reactor
LWR	Light Water Reactor
MOX	Mixed Oxide fuel
MSR	Molten Salt Reactor
NRC	U.S. Nuclear Regulatory Commission
PBMR	Pebble Bed Modular Reactor
PIRT	Phenomena Identification and Ranking Table
PWR	Pressurized Water Reactor
RCCA	Rod Cluster Control Assembly
RCS	Reactor Coolant System
RIA	Reactivity Insertion Accident

RLPV	Ruptura da Linha Principal de Vapor
SBLOCA	Small Break Loss-of-Coolant-Accident
SCAR	Sistema de Controle de Água de Reposição
SCQV	Sistema de Controle Químico e Volumétrico
SCWR	Supercritical water reactor
SG	Steam Generator
SIS	Sistema de Injeção de Segurança
SMART	System-Integrated Modular Advanced Reactor
SRR	Sistema de Refrigeração do Reator
SRTB	Sistema de Regeneração Térmica de Boro
TAR	Tanque de Água de Recarregamento
TIB	Tanque de Injeção de Boro
VC	Volume de Controle
VHTR	Very-High-Temperature Reactor
VVER-440 (ou WWER – 440)	Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactor-440 (Water-Water Energetic Reactor – 440)
VVER-1000 (ou WWER – 1000)	Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactor-1000 (Water-Water Energetic Reactor – 1000)

# Sumário

	<b>Página</b>
1 INTRODUÇÃO.....	22
1.1 Justificativa.....	27
1.2 Objetivos.....	29
2 REVISÃO DA LITERATURA .....	30
2.1 Reatores PWR.....	32
2.2 Reatores PWR inovadores.....	34
2.3 Reatores avançados integrais.....	35
2.3.1 Reator IRIS.....	36
2.4 Eventos com variação da concentração de boro.....	43
2.5 Fundamentos da Simulação Dinâmica.....	48
2.5.1 Modelagem do sistema dinâmico.....	48
2.5.2 Classificação de um Sistema Dinâmico.....	51
3 FUNDAMENTOS CONCEITUAIS .....	53
3.1 RELAP.....	53
3.2 MODELICA.....	54
3.3 SIMULINK.....	55
3.4 Conceitos básicos sobre a operação de um reator PWR.....	57
3.5 Bases de projeto, descrição dos equipamentos e parâmetros de operação.....	61
3.6 Sistema de Injeção de Segurança (SIS) em um PWR.....	66
3.6.1 Descrição dos Principais Componentes do SIS.....	67
3.7 Sistema de Injeção de Segurança no IRIS.....	71
4 METODOLOGIA.....	74
4.1 Modelo Matemático .....	74
4.2 Modelo Neutrônico.....	75
4.3 Modelo Termoidráulico.....	77
4.3.1 Plenum inferior do vaso.....	77
4.3.2 Núcleo do reator.....	78
4.3.3 Plenum superior do vaso.....	78
4.3.4 Bomba do refrigerante do reator.....	79

4.3.5 Transferência de Calor para o Gerador de Vapor.....	79
4.4 Equações do Modelo do Secundário do Gerador de Vapor (Modificadas).....	82
4.5 Modelo em Simulink.....	85
4.6 Validação do modelo em SIMULINK.....	85
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	90
6 CONCLUSÕES.....	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
APÊNDICES.....	126
APÊNDICE A – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MODELO TERMOIDRÁULICO (CIRCUITO PRIMÁRIO).....	127
APÊNDICE B – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MODELO TERMOIDRÁULICO (CIRCUITO SECUNDÁRIO DO GERADOR DE VAPOR).....	132
APÊNDICE C – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MODELO TERMOIDRÁULICO (CIRCUITO SECUNDÁRIO DO GERADOR DE VAPOR – MODIFICADO).....	142
APÊNDICE D – DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO PARA A FRAÇÃO MÉDIA DE VAZIOS .....	151
APÊNDICE E – ESQUEMA DO CÓDIGO MODIRIS EM SIMULINK/MATLAB.....	154
APÊNDICE F – DEDUÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO DO BORO NO PRIMÁRIO DO REATOR IRIS.....	155
APÊNDICE G – DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DO COEFICIENTE DE REATIVIDADE DEVIDO À CONCENTRAÇÃO DE ÁCIDO BÓRICO.....	158
ANEXOS.....	160
ANEXO A – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DA CINÉTICA PONTUAL PARA REATORES TÉRMICOS.....	161
ANEXO B – PARÂMETROS NEUTRÔNICOS E TERMOIDRÁULICOS EMPREGADOS NA INICIALIZAÇÃO DO CÓDIGO MODIRIS.....	163



## 1 INTRODUÇÃO

As excelentes propriedades da água como moderador de nêutrons de um reator nuclear térmico fazem com que reatores de potência moderados a água sejam bem mais compactos. O núcleo de um reator de potência moderado a água pode apresentar dimensões que totalizam cerca de 2 m de altura e 3 m de diâmetro. Este foi o fato que motivou o uso inicial desses reatores na propulsão naval, principalmente de submarinos. Foi desse modo que o primeiro submarino com propulsão nuclear, o U.S.S. Nautilus, lançado ao mar em 1955 pela marinha norte-americana, utilizou um reator desse tipo.

Outra característica importante da água, no que se refere ao uso em reatores nucleares de potência, diz respeito às propriedades termodinâmicas desse fluido como refrigerante. Como, sob o ponto de vista termodinâmico, é desejável que a temperatura da água refrigerante em um reator nuclear de potência seja a mais alta possível, torna-se imprescindível que o reator opere em pressões bastante elevadas, em um intervalo de 13,79 MPa e 17,24 MPa (LAMARSH, 1975).

Devido ao fato de a água, utilizada como moderador e refrigerante nesses reatores de potência, estar submetida a pressões elevadas, os mesmos são designados como reatores refrigerados a água pressurizada – do inglês, *Pressurized Water Reactor* (PWR). Nesses reatores, os valores típicos para a temperatura e a pressão da água são, respectivamente, 300°C e 16,212 MPa.

Os reatores PWR, além de muito mais compactos, apresentam também uma densidade de potência maior, definida como sendo a potência produzida por unidade de volume do núcleo.

O controle da potência do reator é realizado por intermédio de feixes de barras de controle e pela adição de ácido bórico na água. Para o desligamento do reator, utiliza-se um conjunto de barras de segurança que, em condições normais de operação, permanece totalmente fora do núcleo ativo. O material absorvedor de nêutrons que compõe as barras de controle (ou de segurança) é uma liga metálica de prata-índio-cádmio (Ag-In-Cd) contendo em massa 80% de prata, 15% de índio e 5% de cádmio.

Em caso de acidente com perda de fluido refrigerante (conhecido pela sigla

LOCA - *Loss-of-coolant accident*), há um sistema de emergência para resfriamento do núcleo (conhecido pela sigla ECCS - *Emergency Core Cooling System*) que injeta uma solução de ácido bórico diretamente nessa parte do reator.

O pressurizador é um componente de grande importância para os reatores PWR, já que é responsável pelo controle da pressão do sistema de refrigeração, mantendo um resfriamento do núcleo e, conseqüentemente, prevenindo o combustível de sofrer algum dano.

No pressurizador encontramos uma câmara bifásica, na qual as fases líquida e gasosa se encontram, respectivamente, nas partes inferior e superior. Há também um bocal aspersor de água no topo do pressurizador, enquanto aquecedores de imersão se encontram na base.

Havendo, por alguma razão, um aumento brusco na temperatura média do refrigerante, este terá seu volume aumentado, e essa expansão ocasiona a entrada de surtos de água no pressurizador (*insurges*), com o conseqüente aumento do nível de água e da pressão no pressurizador. As válvulas do aspersor são, então, acionadas e água de uma das pernas frias é borrifada pelo aspersor, condensando parte do vapor e limitando, desse modo, o aumento de temperatura.

Quando ocorre uma diminuição no volume do refrigerante e a conseqüente saída de surtos de água do pressurizador (*outsurges*), há uma queda na pressão, que, por sua vez, facilita a vaporização instantânea da água (*flashing*). A diminuição da pressão é atenuada pelo aumento da potência dos aquecedores de imersão encontrados na base do pressurizador.

O desenvolvimento de reatores PWR para geração de eletricidade foi iniciado logo após o uso destes reatores na propulsão de submarinos. No dia 02 de dezembro de 1957, a primeira usina nucleoeleétrica equipada com um reator PWR começou a funcionar em Shippingport, Pennsylvania, EUA, gerando 75 MW elétricos (ISHIGURO, 2002). O reator nuclear PWR desta usina foi projetado e construído pela *Westinghouse Electric Corporation*, tendo como base a tecnologia de reatores nucleares utilizados para propulsão naval.

Nos vinte anos que se seguiram, diversas usinas nucleoeleétricas equipadas com reatores PWR foram construídas não apenas nos EUA, mas também na França, Alemanha Ocidental e Japão.

A taxa de crescimento na construção de reatores PWR em vários países do mundo sofreu uma redução, embora não tenha sido totalmente contida, após o

acidente ocorrido no dia 28 de março de 1979 na usina nucleoeletrica de Three Mile Island (Pennsylvania, EUA), que utilizava um reator PWR. Nesse acidente, em decorrência de erros dos operadores e de falhas em equipamentos, a refrigeração do reator se tornou insuficiente e o calor de decaimento dos produtos de fissão causou derretimento de parte do núcleo do reator, incluindo elementos combustíveis e algumas estruturas de suporte. Entretanto, o material radioativo liberado no reator, constituído principalmente pelos produtos de fissão radioativos, ficou contido dentro do vaso de pressão, que manteve sua integridade estrutural. Durante os dez anos subsequentes, atenção especial foi dedicada ao aperfeiçoamento das condições de segurança e à melhoria das características operacionais deste tipo de reator.

Após mais de quarenta anos de desenvolvimento, os reatores PWR atingiram um estágio no qual a maior parte dos reatores desse tipo construídos mais recentemente são similares uns aos outros no que se refere às características principais e aos parâmetros operacionais. Assim, pois, a descrição geral que será feita a seguir e a representação esquemática mostrada na Figura 1 (LAMARSH, 1975) podem ser consideradas muito mais como típicas dos atuais reatores PWR em funcionamento no mundo do que como referentes a um reator em particular.

Por outro lado, a energia nuclear enfrenta certa resistência por parte da sociedade, o que tem dificultado o pleno desenvolvimento desse tipo de insumo energético, não só no Brasil como no mundo. A baixa popularidade e o temor de acidentes nucleares semelhantes ao ocorrido em *Chernobyl* (1986), aliados à desinformação, reforçam nossa compreensão de que condições extremas de segurança devem ser estudadas, simuladas e testadas exaustivamente a fim de convalidar a tecnologia nuclear como uma alternativa viável e segura para a crise energética mundial.

Assim, sob pedido do *Departamento de Energia* do governo Norte Americano (DOE), um consórcio internacional, com cerca de vinte organizações, em um total de dez países (do qual o Brasil faz parte), liderado pela *Westinghouse*, propôs-se a desenvolver um reator 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 é projetado para eliminar (ou minimizar), as chances de ocorrência de acidentes, sendo essa capacidade

conferida pela filosofia de projeto *safety-by-design* (CARELLI et al., 2004).

Desde o início, o reator IRIS deveria ser projetado, fabricado e comercializado por meio de uma parceria internacional, na qual todos os membros atuariam como sócios. Universidades e laboratórios vêm propondo e desenvolvendo várias soluções inovadoras, sendo o reator IRIS o primeiro projeto de reator nuclear em que as áreas acadêmica e industrial atuam em parceria, compartilhando as mesmas responsabilidades.

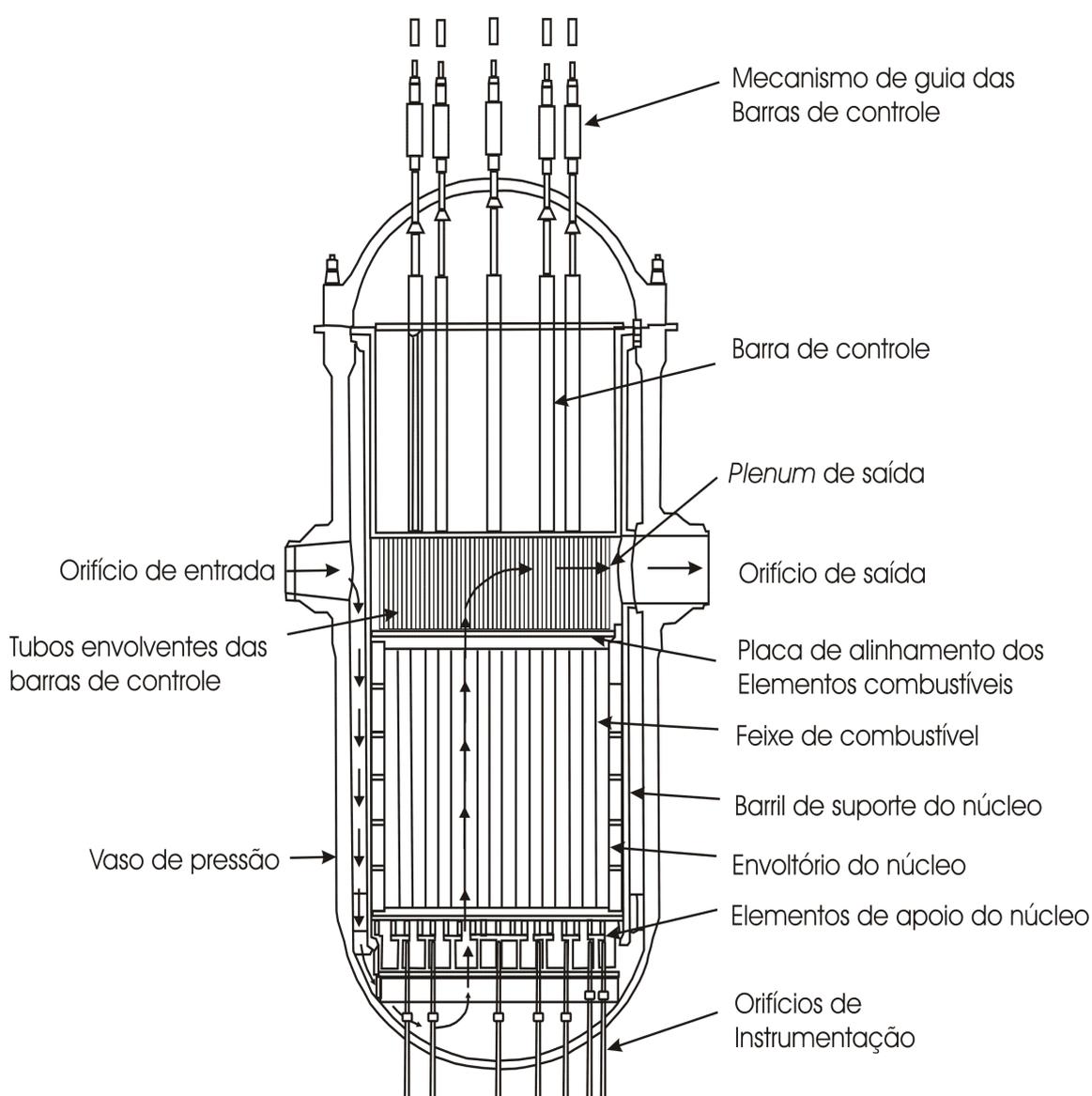


Figura 1 – Secção longitudinal reta de um PWR convencional (LAMARSH, 1975)

O reator IRIS tem como propósito o atendimento dos seguintes requisitos:

- Proporcionar mais segurança durante o regime de operação;
- Utilizar o combustível de forma eficiente para minimizar os rejeitos radioativos;
- Usar um ciclo de combustível que ofereça maior resistência à proliferação de armas nucleares;
- Minimizar o custo total relativo à energia elétrica.

O pressurizador do reator IRIS encontra-se na parte superior do vaso de pressão. Tal componente consiste em uma estrutura isolada e serve como divisor entre o fluxo de refrigeração circulante e a água saturada do pressurizador. A transferência de calor entre o fluido mais aquecido e a água sub-resfriada do circuito primário é atenuada devido a um sistema isolante. Na porção inferior do pressurizador se encontram os aquecedores, sendo tal região dotada de orifícios de surto por onde passa a água do primário (BARROSO et al., 2003).

Uma vazão constante de borrifio é sempre mantida em pressurizadores de PWRs convencionais. Essa vazão é retirada de uma das pernas frias e, ao ser aspergida a partir do topo do pressurizador, espalha-se sob a forma de gotículas na interface líquido-vapor do pressurizador.

Uma vazão de mesma intensidade sai do pressurizador pela linha de surto e entra na perna quente do circuito primário, garantindo uma razoável homogeneização entre a água saturada do pressurizador e a água sub-resfriada do circuito primário. Caso haja um *outsurge*, tais águas apresentarão concentrações de boro semelhantes, não provocando alterações significativas na potência.

Um outro mecanismo de circulação deverá ser adotado para a homogeneização das concentrações de boro no IRIS, já que inexistente uma linha de aspersor. Uma possibilidade que vem sendo proposta é a de serem dispostos alguns orifícios de circulação situados em uma região convenientemente escolhida. Com isso, promove-se a circulação de uma pequena parte do refrigerante no pressurizador, que entrará pelos orifícios de surto e, devido a uma diferença de carga hidráulica, sairá pelos orifícios de circulação.

## 1.1 Justificativa

O controle da potência de um reator do tipo PWR é feito de diversas formas. Uma delas é através do boro sob a forma de ácido bórico diluído no refrigerante do reator. Isso é possível devido ao fato de o boro ser um excelente absorvedor de nêutrons térmicos. Desse modo, ele ajuda a controlar o excesso de reatividade no núcleo de um reator, controlando, com isso, as variações de potência que podem ocorrer durante a operação da usina. A solução de ácido bórico é injetada no refrigerante, levando algumas horas para ser homogeneizado.

Ao longo do ciclo de operação da usina pode ocorrer de uma dada quantidade de água, com concentração de boro inferior a do sistema primário, seja bombeada para o núcleo do reator, fazendo com que haja um aumento indesejável na potência. Isso ocorre principalmente em operações de elevação da potência, onde a concentração de boro do circuito primário é reduzida ao longo de um processo conhecido por *deboração*, e que pode levar várias horas. Nesse período, a concentração de boro no pressurizador tende a ficar gradativamente maior que a do circuito primário.

Também pode acontecer o inverso, i. e., uma queda indesejável de potência, se a água bombeada para o núcleo apresentar uma concentração de boro superior à do circuito primário. Isso acontece em processos de redução de potência, onde a concentração de boro do circuito primário tende a aumentar (processo conhecido por *boração*). Nesse caso, tem-se uma redução da concentração de boro no pressurizador. Essa diferença de concentração será tanto mais acentuada quanto menor for a circulação de água entre o circuito primário e o pressurizador.

Em operações que causam transitórios de pressão (como um degrau positivo de carga demandada pela rede), haverá uma considerável vazão saindo do pressurizador para o circuito primário ou o contrário, e com concentração de boro diferente, ocasionando uma perturbação na potência do núcleo. Tais transitórios não são tão graves a ponto de causarem um impacto na segurança, mas geram perturbações à operação suave da planta e devem ser minimizadas durante a fase de projeto. A intensidade dessa perturbação depende da homogeneização da concentração de boro no interior do pressurizador e da vazão de circulação entre o circuito primário e o pressurizador.

Durante a fase de projeto do reator IRIS, é importante que sejam desenvolvidos códigos computacionais para dar suporte ao desenvolvimento dos sistemas de controle e instrumentação.

Códigos de alta definição como o RELAP5 são proibitivamente lentos para este propósito, sendo necessário o desenvolvimento de modelos simplificados, de baixa definição e alta velocidade que permitem uma rápida avaliação e comparação de diferentes conceitos de controle e segurança.

Projetar sistemas de controle requer um grande número de simulações. Muitas dessas simulações são feitas para otimizar alguns ajustes de parâmetros.

Existem diversos eventos a serem examinados, e estes podem ocorrer em diferentes pontos, tendo em cada um uma pressão, uma temperatura e um escoamento definido.

Com o intuito de examinar todos os casos necessários, os modelos devem ser simples e de rápida execução. Modelos detalhados empregados na análise de acidentes (modelos RELAP, por exemplo) são geralmente bastante enfadonhos e lentos para serem usados no desenvolvimento efetivo de sistemas de controle, mas podem ser usados para avaliações de referência do tipo *benchmark*.

O primeiro modelo do IRIS apropriado para estudos de controle foi desenvolvido por CAMMI et al.(2005) do Instituto Politécnico de Milão. Eles utilizaram a linguagem orientada a objeto chamada MODELICA. Essa linguagem proporciona vários mecanismos convenientes para o desenvolvimento de modelos em vários níveis de detalhes. Entretanto, esses modelos em MODELICA são lentos para serem empregados na fase de avaliação preliminar do protótipo dos sistemas de controle. Assim, deve-se desenvolver modelos mais simples e de rápida execução.

Adota-se o SIMULINK como ferramenta de simulação, principalmente porque ele representa um comportamento bem conhecido e largamente adotado por sistemas de simulação, tanto para análise dinâmica como para propósitos de controle.

Para tanto, o SIMULINK do MATLAB é a opção apropriada para o desenvolvimento de um código computacional dinâmico. Além dele ter a vantagem na velocidade de execução, dispõe de várias ferramentas de fácil manuseio, permitindo a criação e modificação de modelos com grande rapidez, tendo total interação com o ambiente de programação do MATLAB e vice-versa. Isso permite a

utilização das poderosas ferramentas de cálculo disponíveis nessa consagrada linguagem de computação científica. Com isso, pode-se testar e comparar várias ideias de modo muito eficiente.

A exemplo da versatilidade dos modelos desenvolvidos em SIMULINK pode-se citar o modelo dinâmico de um reator de baixa temperatura, o LTR (*Low Temperature Nuclear Reactor*), que é um novo tipo de reator nuclear de baixa potência desenvolvido pelo *Institute of Nuclear and New Energy Technology* (INET) na Tsinghua University. Trata-se, essencialmente, de um pequeno reator de pesquisa que terá aplicações em sistemas de aquecimento, dessalinização da água do mar e geração de energia elétrica em pequena escala (para consumidores isolados dos centros de geração de energia por exemplo). DONG et al.(2009) desenvolveram um modelo dinâmico para o projeto dos sistemas de controle e simulações do LTR em SIMULINK, obtendo alta precisão em seus resultados.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos do presente trabalho são:

- Estudar o comportamento dinâmico dos circuitos primário e secundário do reator IRIS através de um sistema de equações diferenciais que descrevem os balanços termoidráulico e neutrônico;
- Implementar o modelo do primário e do secundário do reator IRIS no programa de simulação dinâmica SIMULINK do MATLAB, ou seja, desenvolver o código de simulação dinâmica do MODELO IRIS (MODIRIS);
- Utilizar o modelo do primário e do secundário do IRIS (MODIRIS), desenvolvido em SIMULINK, como a ferramenta das simulações dos transitórios operacionais de potência devidos às variações de concentração de boro no circuito primário do reator IRIS.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A indústria de geração de energia nuclear e o DOE (*U. S. Department of Energy*) dos Estados Unidos classificam o projeto dos reatores nucleares por categorias e de acordo com a sua geração. Cada geração incorpora uma evolução através de conceitos revolucionários e que proporcionaram um salto na tecnologia dos reatores. Portanto, de acordo com esta classificação, as plantas de potência nuclear podem ser organizadas como:

### 1.Geração I:

Fazem parte desta geração os primeiros reatores cujos protótipos comerciais entraram em operação nas décadas de 50 e 60. São eles os reatores Shippingport (PWR), Dresden (BWR) e Magnox.

### 2.Geração II:

Os reatores de segunda geração foram desenvolvidos nos anos 70 e 80 e estão em uso comercial até hoje. Nos Estados Unidos, são utilizados reatores a água leve (LWR), como os reatores BWR (*boiling water reactor*) e os reatores PWR (*pressurized water reactor*). Já no Canadá, é utilizado o reator a água pesada, o CANDU.

### 3.Geração III:

A geração III é atual geração de reatores. Os reatores dessa geração são designados como projetos *avançados* de centrais nucleares que incluem o ABWR (*Advanced Boiling Water Reactor*), o ACR-700 (*Advanced CANDU Reactor 700*), o System 80+, o APWR (*Advanced Pressurized Water Reactor*), e o AP600 (*Advanced Pressurized Water Reactor 600*).

Estes projetos de reatores foram desenvolvidos nos Estados Unidos e certificados pela *U.S. Nuclear Regulatory Commission* (NRC) nos anos 90. ABWR e APWR foram construídos e estão em operação em outros países do mundo.

### 4.Geração III<sup>+</sup> :

São os reatores que podem estar disponíveis comercialmente a partir de

2010. Estiveram sob desenvolvimento durante os anos 90 e encontram-se em vários estágios de projeto e execução. Incluem o reator modular PBMR (Pebble Bed Modular Reactor), cujo protótipo encontra-se em fase de construção na África do Sul, e o AP1000 (*Advanced Pressurized Water Reactor 1000*), cujo protótipo a China manifestou intenção de iniciar a construção ainda este ano (BLAKE, 2009). Ambos tem características passivas de segurança, e o PBMR é refrigerado a gás, duas características tecnológicas que prefiguram reatores de quarta geração. Outros reatores dessa geração:

- European Pressurized Reactor (EPR) – uma evolução dos reatores Framatome N4 e Siemens Power Generation Division KONVOI;
- Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR) – baseado no ABWR;
- Advanced Power Reactor 1400 (APR-1400) – um avanço no projeto do PWR, sendo a evolução do U.S. System 80+. É atualmente a base para o *Korean Next Generation Reactor* (KNGR);
- mPower – Um avançado reator de água leve, desenvolvido por Babcock e Wilcox.

#### 5. Geração IV :

A concepção dos reatores de quarta geração teve início com o advento do *Generation IV International Forum* (GIF) em 2001. Os reatores de quarta geração podem estar disponíveis comercialmente em 2030, e espera-se que sejam altamente econômicos, inerentemente seguros, produzam o mínimo de rejeitos, e sejam resistentes à proliferação nuclear. Os principais representantes considerados, são:

- VHTR (*Very-High-Temperature Reactor*):

Este tipo de reator utiliza grafite como moderador tendo sido projetado para trabalhar a temperaturas de 1000°C e refrigerado a gás (hidrogênio). O seu núcleo pode ser composto por um bloco prismático ou granular.

- SCWR (*Supercritical water reactor*):

É um protótipo que utiliza como fluido refrigerante a água leve superaquecida altamente pressurizada. Apresenta alto rendimento térmico, por volta de 45% contra 33% da maioria dos LWRs, e planta bastante simplificada.

- MSR (*Molten Salt Reactor*):

É um tipo de reator refrigerado a sal fundido apresentando como principais vantagens: ser inerentemente seguro, combustível utilizado bastante abundante (tório), baixa produção de lixos radioativos por Terajoule de energia fornecida, ótima eficiência termodinâmica das turbinas (Ciclo de Brayton).

- GT-MHR (*Gas Turbine-Modular Helium Reactor*):

Tem características passivas de segurança e é refrigerado a gás (hélio), o que elimina a necessidade de gerar vapor para produzir eletricidade. O resultado é um ciclo de energia simplificado, com elevada eficiência, confiabilidade e baixo custo. A eficiência térmica é aumentada em 50% em relação às plantas convencionais.

O projeto do reator IRIS (*International Reactor Innovative and Secure*) é um reator a água leve (LWR), incorporando uma engenharia avançada para aumentar a segurança e reduzir custos operacionais. Seu projeto é um aperfeiçoamento dos PWRs de terceira geração, mas apresentando características de reatores de quarta geração. Desse modo, é muitas vezes classificado como sendo da geração III<sup>+</sup>.

## 2.1 Reatores PWR

O vaso de pressão no qual está contido o núcleo do reator PWR, assim como toda a tubulação do circuito de refrigeração, devem ser suficientemente robustos para resistir à pressão extremamente elevada a que estão submetidos (a pressão varia entre 14 a 17 MPa), sem apresentar falhas estruturais. Em geral, o vaso de pressão é feito de aço carbono revestido internamente por uma camada de aço inoxidável, sendo a espessura total da parede igual a 215 mm.

A água do circuito primário entra no vaso de pressão a uma temperatura próxima de 550 K (277°C), flui no sentido descendente pelo lado externo, atuando como refletor, atravessa o núcleo em um movimento ascendente e se aquece ao

entrar em contato com as varetas de combustível, chegando a atingir cerca de 590 K (317°C).

A seção de choque para captura radiativa de nêutrons térmicos pela água é razoavelmente alta, fato que requer o uso de urânio ligeiramente enriquecido (em geral entre 2,5% e 3,0%) como combustível. Finalmente, para evitar a corrosão causada pela água em temperaturas elevadas, torna-se necessário utilizar aço inoxidável ou ligas de zircônio como material de revestimento dos combustíveis nucleares. A liga de zircônio denominada Zircaloy passou a ser adotada como o material padrão de revestimento dos combustíveis nucleares em reatores PWR.

O combustível nuclear é dióxido de urânio ( $\text{UO}_2$ ) enriquecido em  $^{235}\text{U}$ , utilizado na forma de pastilhas cilíndricas com 8 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento, acondicionadas em tubos de Zircaloy-4<sup>1</sup> com 10 mm de diâmetro e 4 m de comprimento. Os tubos de Zircaloy-4 são fechados por soldagem, em ambiente altamente pressurizado, sendo as pastilhas de  $\text{UO}_2$  mantidas sob compressão no interior do tubo por meio de molas helicoidais.

As varetas combustíveis, assim constituídas, são agrupadas de maneira compacta através de um arranjo quadrado com 20 cm de lado, formando um elemento combustível.

Cada elemento combustível contém cerca de 256 varetas combustíveis, mantidas fixas por meio de grades espaçadoras feitas com uma liga de níquel (Inconel-718).

Por sua vez, estes elementos combustíveis são posicionados lado a lado para formar o núcleo do reator, cujas dimensões são aproximadamente 3,8 m de diâmetro e 3,7 m de altura, contido dentro de um vaso de pressão com 4,7 m de diâmetro interno e 10 m de altura.

Nos reatores PWR existem de dois a quatro circuitos primários, todos conectados a um circuito secundário. Cada circuito primário contém um gerador de vapor e uma bomba para circulação de água. Ainda em um dos circuitos primários se encontra o pressurizador, responsável pela manutenção da pressão, e o sistema de emergência de refrigeração do núcleo.

Os geradores de vapor estão acima do núcleo, enquanto o vaso de pressão

---

<sup>1</sup> Trata-se de uma liga de zircônio de alta qualidade de composição 98,23% zircônio, 1,45% estanho, 0,21% ferro, 0,1% cromo e 0,01% háfnio, que por possuir baixa seção de absorção de nêutrons térmicos é largamente utilizado na confecção de invólucros para combustível nuclear.

está na região central inferior. Tal disposição facilita a circulação do refrigerante por convecção natural em casos de perda de circulação forçada.

Nos trocadores de calor, usualmente denominados geradores de vapor, vapor de água é produzido na temperatura de 290°C e na pressão de 7,4 Mpa.

## 2.2 Reatores PWR inovadores

Os reatores inovadores já incorporam modernos sistemas de segurança passiva, sendo os principais reatores discutidos a seguir.

AP600:

O AP600 é um reator PWR de 610 MWe. O núcleo, o vaso do reator, componentes internos e combustível são essencialmente o mesmo projeto dos reatores PWR da *Westinghouse* que estão em operação.

A densidade de potência do combustível foi diminuída para fornecer uma margem térmica maior. As bombas, comprovadas no programa do reator da marinha dos Estados Unidos e em outros sistemas de circulação, foram adotadas para melhorar em requisitos de confiabilidade e de manutenção.

O aspecto inovativo do projeto AP600 encontra-se em sua característica de segurança passiva para refrigeração de emergência do reator e do vaso de contenção, proporcionado por forças naturais tais como a gravidade, circulação natural, convecção, evaporação, condensação.

Os extensivos testes dos sistemas passivos de refrigeração do AP600 foram completados e tiveram o suporte de testes confirmatórios realizados independentemente pelo NRC (*U.S. Nuclear Regulatory Commission*) para verificar o projeto e analisar as características do sistema de refrigeração passiva. Assim, o NRC certificou o projeto do AP600. Um trabalho adicional e detalhado do projeto seria necessário antes que a planta estivesse pronta para a construção.

AP1000:

O AP1000 é um PWR de 1.090 MWe que é basicamente o mesmo projeto do AP600, mas com uma taxa superior de potência para obter melhores escalas de economia. Os sistemas passivos de segurança do AP1000 são essencialmente os mesmos do AP600, à exceção de algumas mudanças nas capacidades de alguns

componentes.

A economia térmica do AP1000 é superior ao do AP600, e considera-se improvável que o AP600 esteja disponível realmente, embora a certificação de seu projeto possa apressar a certificação do AP1000.

A taxa superior de potência foi conseguida aumentando-se o comprimento e o número de elementos combustíveis, o tamanho do vaso de contenção do reator e dos componentes do primário, e aumentando-se a altura da estrutura de contenção e o tamanho e capacidade de conversão de energia dos componentes do secundário.

O custo de geração do AP1000 está estimado em 30% menos que o do AP600 por causa da taxa adicional de potência que é obtida com apenas um pequeno aumento no custo de capital.

APR1400:

O Reator APR1400 (*Advanced Power Reactor 1400*) foi desenvolvido na Coreia pela *Korea Electric Power Corporation* (KEPCO). Este reator avançado é um evolução do projeto dos reatores System80+, tendo 1400 MWe.

Algumas das novas características de segurança do APR1400 são os sistemas com injeção direta de água no vaso, sistemas de despressurização e sistemas de alimentação de água.

Além dos reatores avançados citados anteriormente, tem-se o reator **APWR+** (*Advanced Pressurized Water Reactor Plus*) e o reator **EPR** (*European Pressurized Water Reactor*) cuja primeira unidade encontra-se em estágio bastante avançado de construção na Finlândia (BLAKE, 2009). Este reator segue a linha evolucionária incorporando a experiência franco-alemã de fabricação e de operação das usinas fornecidas pelos dois fabricantes. A capacidade considerada para a usina EPR é superior a 1500 Mwe.

### 2.3 Reatores avançados integrais

Entre os reatores avançados integrais, destacam-se o **CAREM** (*Central Argentina de Elementos Modulares*), o **IMR** (*International Modular Reactor*), o **SMART** e o **IRIS**. Serão apresentados sucintamente os dois últimos.

SMART:

O reator SMART (*System-Integrated Modular Advanced Reactor*) é diferenciado dos reatores convencionais pelo fato de a maior parte dos componentes do circuito primário encontrar-se alojada no vaso de pressão, que, juntamente com o alto coeficiente negativo de temperatura do moderador, minimizam a possibilidade de perda de refrigerante e facilitam a circulação natural do mesmo (BAE et al., 2001). O SMART é um PWR de 330 MW térmicos com o propósito de geração de energia elétrica e para dessalinização da água do mar. O SMART, assim como o APR1400, foi desenvolvido na Coreia.

IRIS:

O reator IRIS (*International Reactor Innovative and Secure*) é um reator integral do tipo PWR que está em fase de desenvolvimento pela companhia *Westinghouse*. O IRIS se diferencia dos demais projetos por ser um reator que tem todos os sistemas que compõem o primário no interior do vaso de pressão. Isto oferece uma enorme vantagem em relação a segurança, pois elimina a possibilidade de haver LOCAs de alta intensidade. Suas dimensões reduzidas e projeto modular simplificam a sua construção, não exigindo grandes áreas e reduzindo sobremaneira seu custo, o que é bastante atrativo.

### **2.3.1 Reator IRIS**

O IRIS é um reator do tipo PWR integral cujo projeto teve início em 1999. O projeto conceitual do IRIS foi completado em 2001. Em outubro de 2002 foi dado início ao processo de seu licenciamento junto ao NRC. Trata-se de um reator com uma potência térmica de 1000 MW (335 MW elétricos). Vem sendo desenvolvido através de um consórcio entre várias organizações de dez países, sendo tal consórcio liderado pela Companhia *Westinghouse Electric*. Entre tais organizações, podem-se encontrar indústrias, laboratórios e universidades.

As contribuições dadas pelos membros do consórcio, através da transferência de tecnologia e fornecimento de dados experimentais, vêm possibilitando um acúmulo de informações valiosas ao desenvolvimento do projeto IRIS. Na Tabela 1 (CARELLI et al., 2004) são exibidas as organizações e países envolvidos nesse projeto.

Tabela 1 – Organizações-membro do consórcio IRIS (CARELLI et al., 2004)

<b>Membros do Consórcio</b>	<b>Países</b>	<b>Atividade Desenvolvida</b>
Whestinghouse	Estados Unidos	Coordenação global, núcleo e licenciamento.
BNFL	Reino Unido	Ciclo do Combustível
Ansaldo Energia	Itália	Geradores de Vapor
Ansaldo Camozzi	Itália	Geradores de Vapor e barras de controle
ENSA	Espanha	Vaso de pressão
NUCLEP	Brasil	Pressurizador
OKBM	Rússia	Testes e dessalinização
ORNL	Estados Unidos	Blindagem, pressurizador e núcleo
CNEN	Brasil	Pressurizador e dessalinização
ININ	México	Avaliação de risco
LEI	Lituânia	Análise de segurança
Univ. Politécnica de Milão	Itália	Análises térmicas e hidráulicas
Tokyo Inst. of Technology	Japão	Núcleos avançados, PRA
MIT	Estados Unidos	Manutenção e núcleo
Univ. de Zagreb	Croácia	Análise neutrônica e segurança
Univ. de Pisa	Itália	Vaso de contenção
Univ. Politécnica de Turim	Itália	Fatores humanos
Univ. de Roma	Itália	Rejeito radioativo
TVA	Estados Unidos	Manutenção
Eletronuclear	Brasil	Aplicações gerais
Univ. da Califórnia – Berkeley	Estados unidos	Análise neutrônica
Univ. do Tennessee	Estados Unidos	Modularização
Univ. Estadual de Ohio	Estados Unidos	Monitoração do núcleo
Univ. Estadual de Iowa	Estados Unidos	Monitoração
Univ. de Michigan	Estados Unidos	Monitoração

Ao mesmo tempo em que enfatiza a configuração integral, que se reflete nos aspectos de segurança, simplicidade e economia, o projeto IRIS ainda se apoia na consagrada tecnologia dos reatores passivos avançados AP600 e AP1000, ambos desenvolvidos pela *Westinghouse*.

O vaso de pressão desse reator abriga não só o combustível e as barras de controle, mas também a maior parte dos componentes do sistema de refrigeração, incluindo as bombas, os geradores de vapor, o pressurizador, os mecanismos de barras de controle e o refletor de nêutrons. O vaso de pressão do reator IRIS, quando comparado ao de um PWR comum, é maior. Entretanto, as dimensões do sistema de contenção do IRIS são menores que as dos PWRs tradicionais, e a consequência imediata é a redução do tamanho global da instalação (WESTINGHOUSE, 2003b).

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 a implementação de 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 desativação do reator e o transporte de componentes.

O vaso de pressão do reator IRIS e seus compartimentos internos são projetados para permitir o acesso ao combustível após a remoção da tampa e dos dispositivos internos superiores. Da mesma forma, 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.

Procura-se desenvolver uma manutenção otimizada no projeto IRIS, de modo que os intervalos entre os desligamentos destinados à manutenção não sejam

inferiores a 48 meses. Tal fato proporciona uma economia nos custos de organização e manutenção. Diferentes composições de combustível são propostas, prevalecendo duas:  $\text{UO}_2$  enriquecido e MOX (mistura de óxidos de urânio e plutônio). A princípio, o combustível do IRIS tem um enriquecimento igual a 4,95% de  $\text{U}^{235}$ , ou seja, um valor abaixo do atual limite de 5%, a fim de satisfazer a exigência de combate à proliferação nuclear.

O agrupamento de combustível no reator IRIS é formado por 264 barras de combustível, cada qual com 0,0095 m de diâmetro externo, todas dispostas em um arranjo de formato quadrangular com 17 x 17 barras. A posição central é destinada à análise de instrumentação do núcleo, enquanto as outras 24 posições são ocupadas por barras de controle que, juntamente com o boro presente no refrigerante, controlam a reatividade do sistema (CARELLI et al., 2004).

Duas considerações importantes foram utilizadas no processo de seleção do revestimento do combustível. Primeiramente, do ponto de vista da segurança, o revestimento deve garantir a integridade do combustível mesmo ao se atingir o limite da queima. A segunda consideração é concernente à economia de nêutrons. Para o projeto de queima de até 8 anos, o revestimento de zircaloy apresenta-se como solução viável. Para o caso de queima direta igual a 120000 MWd/tU ( $1,04 \times 10^{13}$  J/kg de urânio) de até 15 anos, é preferível utilizar-se aço inoxidável (WESTINGHOUSE, 2003a).

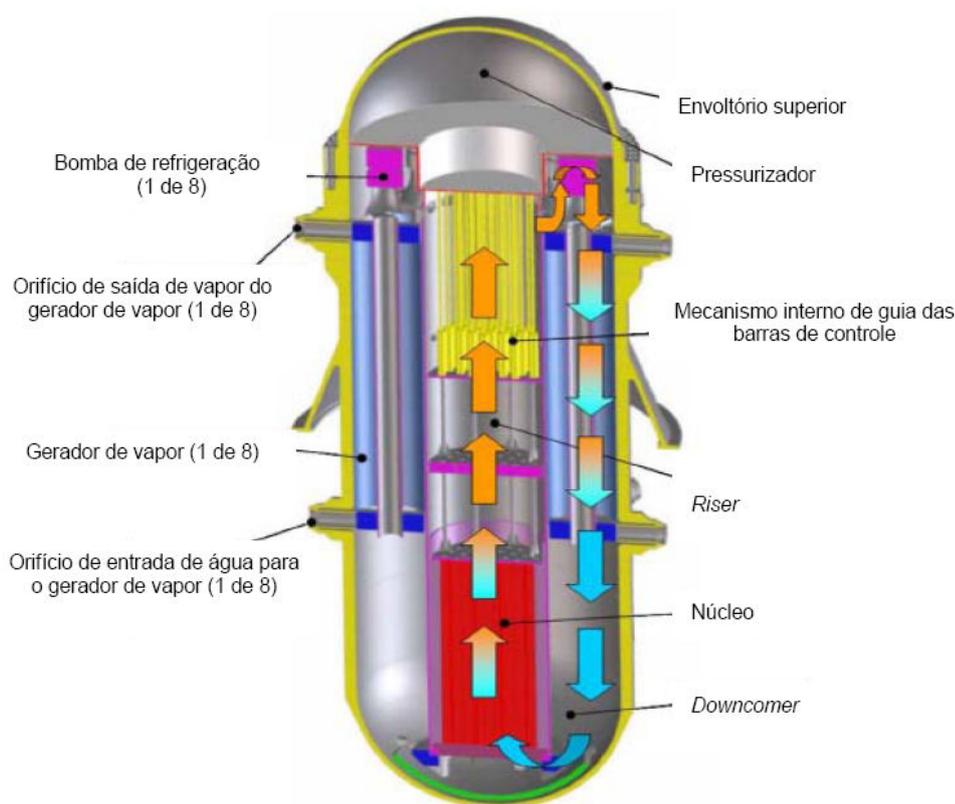
Outra característica marcante no reator IRIS é a capacidade de seu sistema de segurança eliminar acidentes de uma forma tal que não é encontrada em reatores convencionais. A eliminação do LOCA (acidente de perda de refrigerante) de alto impacto é uma das características mais evidentes em reatores integrais, uma vez que não há, nesses reatores, longos sistemas de tubulação (WESTINGHOUSE, 2003c).

São mostrados na Figura 2 (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.

Conforme é mostrado na Figura 2, o refrigerante, movendo-se em uma trajetória fechada, atravessa ascendentemente o núcleo e, após um curto trajeto radial, segue em direção a oito bombas primárias, sendo bombeado no sentido descendente, resfriando-se nos geradores de vapor, em direção à região anelar entre a barreira do núcleo e a parede do vaso para, então, retornar ao núcleo.

O vaso de pressão do reator IRIS consiste em um cilindro limitado na parte inferior por uma base semi-esférica; na parte superior há uma estrutura removível dotada de flanges e juntas de vedação. Uma camada de aço inoxidável, com 0,006 m de espessura mínima, reveste a superfície interna do vaso.



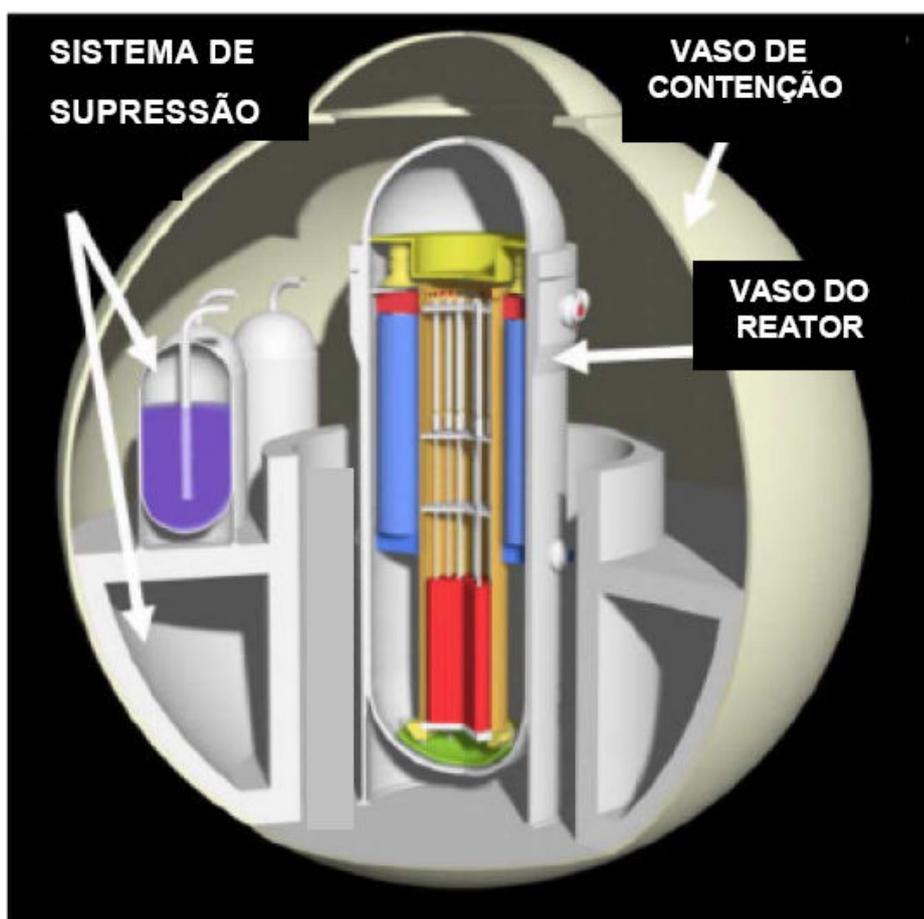
*Figura 2 – Vista seccional do vaso de pressão do reator IRIS*

*(CARELLI et al., 2004)*

Com as dimensões reduzidas devido à configuração integral, aliadas à geometria esférica mostrada na Figura 3 (WESTINGHOUSE, 2003a), 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. O vaso de contenção esférico possui um diâmetro interno igual a 25 m, dos quais 40% se encontram no subsolo. No interior do sistema de contenção se encontram uma piscina de supressão de pressão e um poço de inundação para o fornecimento de água através da ação gravitacional, garantindo que a seção inferior do vaso do reator (local onde se encontra o núcleo) esteja preenchida com água em caso de acidentes.

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 intensidades, 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).



*Figura 3 – Vista do interior do vaso de contenção do IRIS  
(WESTINGHOUSE, 2003a)*

Apenas tubulações com diâmetro inferior a 0,1 m se encontram no vaso de pressão do reator, sempre acima do núcleo. Portanto, apenas pequenos LOCAs precisam ser levados em consideração. Uma vez garantida a eliminação de LOCAs de alta e média intensidades, LARSON et al. (2007) realizaram análises para identificar os fenômenos relevantes em LOCAs de pequena intensidade no reator IRIS. Essas análises, conhecidas como PIRT (do inglês *Phenomena Identification and Ranking Table*), além de classificarem os fenômenos de acordo com sua importância, organizam o planejamento para obtenção de dados analíticos e experimentais.

O amplo espaço no interior do vaso de pressão do reator facilita a circulação natural do refrigerante e, conseqüentemente, a retirada de calor residual. Além disso, 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 de refrigeração do IRIS estão inteiramente dispostas no interior do vaso de pressão do reator, possuindo apenas pequenas penetrações externas para os cabos elétricos e para o suprimento da água de resfriamento. Tal localização, aliada à sua configuração geométrica (do tipo bobina), maximiza a inércia de rotação, originando fluxos de alta intensidade (CARELLI et al., 2004). Bombas desse tipo nunca foram utilizadas em instalações nucleares; porém, a configuração integral do vaso de pressão do reator IRIS e a pequena queda de pressão no sistema de refrigeração do primário permitem a adoção de tais bombas (WESTINGHOUSE, 2003a).

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. Os oito geradores de vapor do reator IRIS estão localizados entre o barrilete do núcleo e o vaso de pressão do reator. Cada gerador consiste em um feixe com 656 tubos feitos de uma liga de cromo e ferro. A geometria helicoidal é responsável pela capacidade do gerador em suportar expansões térmicas sem sofrer tensões mecânicas excessivas, além de resistir a intensas vibrações provocadas pelo fluxo do refrigerante. Além disso, havendo falha em um dos geradores, os outros não são afetados (CARELLI et al., 2004).

O refletor radial de nêutrons do reator IRIS, feito de aço inoxidável, promove

uma diminuição na fuga de nêutrons, melhorando o aproveitamento destes e permitindo a extensão do ciclo do combustível. Juntamente com a região de *downcomer*, tal refletor ainda reduz a fluência dos nêutrons rápidos no barrilete do núcleo, aumentando o tempo de vida do vaso e minimizando a espessura da blindagem radiológica (WESTINGHOUSE, 2003a).

## 2.4 Eventos com variação da concentração de boro<sup>2</sup>

A análise de acidentes é parte fundamental da área de segurança de centrais nucleares. A partir da formulação de acidentes hipotéticos é estudado o comportamento da usina e extraídos os critérios que determinam as condições a serem atendidas para a sua operação segura.

As usinas nucleares são licenciadas para operação com a garantia de que os acidentes e transitórios postulados não ultrapassem limites de segurança pré-estabelecidos.

Nos últimos anos, estudos de transitórios com deficiência na homogeneização de boro em PWRs vêm recebendo bastante atenção. Uma solução de ácido bórico<sup>3</sup> é normalmente adicionada ao refrigerante do circuito primário, auxiliando no controle das taxas de fissão no núcleo do reator. Tal sistema, entretanto, não consegue controlar, sozinho, a reatividade, já que a mudança na concentração de boro não atua tão rapidamente para satisfazer os requisitos de segurança, como o fazem as barras de controle.

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

Para superar a adição de reatividade positiva resultante de um rápido resfriamento, uma alta concentração de boro, na forma de ácido bórico, tem sido

---

2 Ao longo do texto, as expressões relacionadas ao boro devem ser entendidas como referentes ao ácido bórico. E ficará subentendido e evidente quando se tratar do elemento químico boro.

3 Há uma série de razões para usar a solução de ácido bórico diluído no refrigerante. Por um lado, reduz substancialmente o número de barras de controle exigido em um reator. Uma vez que as barras de controle e seus mecanismos de movimentação são dispendiosos, isso resulta em economia substancial de custos. Além disso, porque o ácido bórico é mais ou menos uniformemente distribuído ao longo do núcleo do reator, as mudanças na reatividade do sistema, resultante de alterações na concentração de ácido bórico, podem ser feitas sem perturbar a distribuição de potência no núcleo (LAMARSH, 1975).

usada nos tanques de injeção. Altas concentrações de boro implicam em pesadas cargas operacionais e de manutenção para as usinas nucleares projetadas pela Westinghouse, devido à necessidade de evitar a cristalização e precipitação do boro.

Há algum tempo, ocorreram incidentes durante a operação de reatores em diversas usinas do tipo *Westinghouse*, como a Usina Angra 1, nas quais o ácido bórico foi cristalizado nos componentes internos de equipamentos de segurança como bombas e tubulações, tornando esses sistemas inoperáveis e, por consequência, provocando o desligamento da usina, o que implica em sérios prejuízos. Assim, SANTOS (1999) desenvolveu um trabalho, fruto de um convênio entre a COPPE/UFRJ e a ELETRONUCLEAR S.A., propondo a avaliação dos aspectos de segurança envolvidos para possibilitar a redução na concentração do ácido bórico estipulada no projeto original da Usina Angra 1.

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

A deficiência na homogeneização está relacionada a eventos externos ou internos que conduzem à formação, no sistema primário, de volumes parcial 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, no fenômeno de transferência de calor nos regimes de vaporização-condensação.

Nas experiências realizadas por KIGER & GAVELLI (2001), construiu-se uma instalação transparente de testes para análise de misturas. A escala em volume dessa instalação em relação ao protótipo do PWR *Babcock and Wilcox* era igual a 1:500. Devido à considerável diferença entre os números de Reynolds no protótipo e no modelo, vários testes foram realizados nesse último, variando-se este número adimensional de  $5 \times 10^3$  a  $2 \times 10^4$ , constatando-se a ausência de diferenças qualitativas no modelo de escoamento quando se alterou esse parâmetro adimensional.

De acordo com as análises, verificou-se a existência de um campo de escoamento complexo e consideravelmente não-uniforme.

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. Nessas análises, os valores desse parâmetro adimensional variaram entre  $4,5 \times 10^3$  e  $1,8 \times 10^4$ .

Através de análises feitas por PERONA et al. (1998), também se constatou uma considerável influência do número de Reynolds no tempo de homogeneização. Tal tempo, porém, não era função exclusiva desse parâmetro, mas variava de acordo com a posição em que o jato de concentração diferente era inserido.

Segundo BREIDENTHAL et al. (1990), o tempo de homogeneização varia inversamente com o tempo de injeção durante injeções rápidas, aumentando linearmente com este último para injeções prolongadas.

A existência de válvulas isolantes principais nas pernas fria e quente de cada circuito primário é uma característica de reatores do tipo WWER-440. Tais válvulas permitem a desconexão de qualquer parte do circuito, ainda que outras sejam mantidas em atividade como, por exemplo, nos casos de perda de refrigerante. Entretanto, a conexão de um setor previamente desconectado pode acarretar uma homogeneização deficiente para a solução de ácido bórico. Esse tipo de acidente foi investigado por ROHDE et al. (1997) através da combinação dos códigos computacionais DYN3D e SiTap e, de acordo com as análises, o acidente mais grave ocorreria se fosse conectado ao núcleo um setor com água completamente desprovida de boro.

Análises relativas à deficiência na homogeneização de boro também foram realizadas por IVANOV et al. (1999a) em mais de um tipo de reator VVER (*Vodno-Vodyanoi Energetichesky Reactor*). Comparando-se os reatores VVER-440 e VVER-1000, verificou-se que, em situações transitórias, as consequências eram menos graves no primeiro.

GANGO (1997), realizando análises de acionamento de bomba em um reator VVER-440, juntamente com simulações computacionais, concluiu que, embora o processo de mistura de boro fosse uma combinação complexa de fenômenos

advectivos e difusivos, os gradientes de concentração eram suavizados principalmente pela turbulência, tendo a difusão molecular pouca relevância. Com essas análises, corroborou-se a dependência da homogeneização em relação às condições geométricas da instalação.

BREIDENTHAL et al. (1990) desenvolveram um modelo para analisar a emissão de jatos em volumes confinados. Segundo tal modelo, a mistura devida à difusão molecular pode ser ignorada, ocorrendo uma homogeneização mais rápida quando se aumenta a energia de injeção.

Foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Politécnica de Milão um novo conceito de PWR, ao qual se deu o nome AMEBA (*Alta Moderazione e Basso Arricchimento*), que significa alta moderação e baixo enriquecimento. Nesse conceito, o circuito primário não apresenta qualquer concentração de boro a fim de se evitar homogeneização deficiente quando houver abertura das válvulas de segurança (NOVELLI, 2000).

Na Universidade do Estado da Pensilvânia, acoplaram-se dois códigos computacionais, TRAC-PF1 e NEM, para a modelagem da homogeneização e do transporte de boro entre os componentes de um reator. O primeiro código é destinado à análise de parâmetros térmicos e hidráulicos, enquanto o segundo analisa questões relativas à física de nêutrons. Com os códigos acoplados para reatores do tipo PWR, obtiveram-se resultados precisos tanto na distribuição de potência no estado estacionário quanto em situações transitórias (IVANOV et al., 1999b).

NIGRO & D'AURIA (2003), usando o código RELAP5-3D, mostraram que em um PWR, durante um acidente de inserção de reatividade (RIA – *Reactivity Insertion Accident*), como a injeção de água deborada, há uma rápida excursão de potência. De fato, a excursão de potência observada depende fortemente da mistura no downcomer do vaso de pressão do reator: dada uma massa de água deborada que entra no vaso de pressão do reator em um certo instante, quanto menor for a concentração de boro, maior será o pico de potência.

Estudos de homogeneização de boro em situações estacionária e transitória foram realizados por KLIEM et al. (2004) acoplando-se os códigos DYN3D, de cinética neutrônica, e SAPR, para modelagem de mistura de refrigerante. Nas análises, assumiu-se que água isenta de boro era formada em um dos circuitos durante o desligamento do reator. Variando-se a quantidade inicial dessa água, foi

verificado que, em uma situação estacionária, volumes inferiores a 14 m<sup>3</sup> não reconduziriam o reator à criticalidade. Já em situações transitórias, volumes superiores inseririam quantidades significativas de reatividade, conduzindo o reator à supercriticalidade.

ROHDE et al. (2005) realizaram análises para verificar como águas com diferentes características (temperatura, densidade, concentração de aditivos, etc.) se misturam na perna fria e no *downcomer* de um PWR antes de entrarem no núcleo de um reator. Obtiveram-se dados relativos à mistura de volumes com acentuadas resoluções espacial e temporal a partir de várias instalações de testes, cobrindo diferentes condições geométricas e de escoamento.

O reinício da circulação natural após um novo enchimento do sistema primário foi analisado na instalação de testes PKL por UMMINGER et al. (2002). Nessa análise, através de injeções simétricas de refrigerante nos quatro circuitos de um PWR, examinou-se a ocorrência de diluição de boro após rupturas de pequeno e médio portes no sistema primário. Embora houvesse condições de simetria nas injeções, verificou-se que a circulação natural se iniciava em tempos diferentes e variava sua intensidade, fazendo com que volumes de água com baixa concentração de boro atingissem o vaso do reator em tempos diferentes após a mistura com a água do *downcomer*, minimizando as chances de ocorrência da recriticalidade. Juntamente com o código computacional S-RELAP5, verificou-se que a circulação natural principiava no circuito que possuía ruptura.

Em alguns tanques de armazenamento de grande volume, a homogeneização dos componentes de uma mistura se faz necessária. A utilização de misturadores mecânicos em grandes tanques não é corriqueira, sendo a homogeneização feita por meio da advecção (uma escolha usual). Nessa técnica, um jato flui em direção à massa do líquido no interior do tanque com uma considerável velocidade de entrada, expandindo-se à medida que se afasta do orifício de entrada e misturando-se com o fluido ambiente. Os constituintes da mistura do tanque devem ser recirculados através de uma bomba normalmente externa ao tanque, retornando a este novamente por intermédio de jatos (PERONA et al., 1998).

## 2.5 Fundamentos da Simulação Dinâmica

### 2.5.1 Modelagem do sistema dinâmico

Um *sistema* pode ser definido como uma coleção de objetos que ficam agrupados devido a algum tipo de interação ou interdependência entre eles, de modo que existam relações de causa e efeito nos fenômenos que ocorrem com os objetos desse sistema (MONTEIRO, 2006). São exemplos de sistemas: o Sol e os planetas, o ecossistema de um mangue.

Um sistema é dito *dinâmico* quando algumas grandezas que caracterizam seus elementos constituintes variam no tempo (MONTEIRO, 2006).

Estudar a dinâmica de um sistema é verificar de que modo algumas de suas propriedades variam no tempo, tendo em consideração as causas que induzem essa variação.

O estudo teórico da evolução temporal das grandezas que caracterizam um sistema é importante principalmente quando:

- O sistema ainda não existe e se encontra em fase de projeto.
- O sistema já existe e se deseja elucidar algum comportamento inesperado observado no seu funcionamento, como um defeito em algum dos seus componentes ou se esse era seu comportamento real, tratando-se de um erro no projeto.
- O teste com o sistema real é muito caro ou perigoso, sendo mais viável a realização de estudos teóricos e simulações computacionais baseadas nas equações representativas da dinâmica do sistema.

O primeiro passo necessário ao estudo e controle de vários desses sistemas recai na obtenção das equações que descrevem seu comportamento dinâmico, mais comumente denominadas modelos quantitativos dos sistemas (DORF & BISHOP, 2001).

Um modelo matemático de um sistema dinâmico pode ser definido como uma equação, ou um conjunto delas, que representa a dinâmica desse sistema com

precisão, ou pelo menos de uma forma bastante razoável.

Obter um *modelo matemático*<sup>4</sup> aceitável e que rege a dinâmica do sistema é a primeira e a mais importante parte a ser considerada na análise do sistema. Assim, modelar um sistema, significa obter a equação ou conjunto de equações, que rege sua dinâmica.

Algumas etapas importantes que podem ser tomadas como prioritárias nos estudos para a obtenção de um modelo são:

- Definir e compreender o sistema que se deseja modelar e seus componentes<sup>5</sup>;
- Atingir percepção e formulação das hipóteses a serem consideradas;
- Efetuar as linearizações que se mostrarem necessárias e práticas;
- Equacionar o modelo;
- Solucionar as equações;
- Examinar e validar a solução e as hipóteses;
- Aceitar ou não o modelo obtido.

Cumpra observar também que cada uma dessas etapas aqui sugeridas pode, de acordo com a complexidade do sistema, demandar um longo e extensivo estudo.

Outro ponto importante a ser considerado quando do estabelecimento de um modelo matemático para um sistema é o de precisão *versus* simplicidade.

Quando se estuda um modelo matemático inicial, procura-se fazê-lo da forma mais simples possível e, para isso, algumas propriedades físicas inerentes ao sistema são ignoradas, principalmente se os objetivos forem a obtenção de um modelo matemático linear e um sistema composto por equações diferenciais ordinárias.

Por outro lado, tal procedimento deve resultar em um modelo que represente o sistema de uma forma razoavelmente adequada (OGATA, 1998).

Em geral, quando se aborda um novo sistema, parte-se de um modelo mais

---

4 Um modelo matemático pode não ser o único para um determinado sistema e nem mesmo pertencer a um único domínio, podendo, por exemplo, ser formulado nos domínios do tempo ou da frequência, dependendo do sistema considerado e de suas circunstâncias particulares, e assumindo, assim, diferentes formas (OGATA, 1998).

5 Cabe aqui ressaltar que em sistemas mais complexos pode ser utilizada a modelagem por partes ou por subsistemas, de forma que seja simplificado o processo.

simplificado e que forneça uma visão mais ampla dele. Depois, gradativamente, outros detalhes são adicionados, de forma que o modelo torne-se mais completo e representativo do sistema físico, sempre se considerando o compromisso entre a precisão e a viabilidade.

Em suma, o estudo de um sistema dinâmico é realizado basicamente em quatro etapas:

- *Modelagem matemática*: Criação de uma representação matemática do fenômeno físico, cujo comportamento se ajuste suficientemente bem ao comportamento do sistema real.  
Podem ser obtidos diversos modelos matemáticos que descrevem o comportamento dinâmico de um sistema real. A escolha do modelo depende do grau de precisão desejado e do tempo disponível para o processamento computacional.
- *Comportamento dinâmico*: Nesta etapa, investiga-se o comportamento dinâmico do modelo matemático. Verifica-se a resposta temporal das variáveis de saída como função das alterações nas variáveis de entrada.
- *Aplicação do modelo*: Emprega-se o modelo para a obtenção da solução de um problema.
- *Validação do modelo*: Processo de comparação dos valores simulados com os reais. Esse processo permite que erros no modelo matemático original possam ser detectados e corrigidos.

Segundo DORF & BISHOP(2001) o *estado de um sistema* é descrito em termos de um conjunto de *variáveis de estado*  $[x_1(t), \dots, x_n(t)]$ .

Considere o sistema mostrado na Figura 4 a seguir. Seja  $y_1, \dots, y_m$  os sinais de saída e  $u_1, \dots, u_r$  os sinais de entrada. O conjunto de variáveis de estado  $[x_1(t), \dots, x_n(t)]$  é tal que conhecendo o presente estado do sistema (condições iniciais  $[x_1(t_0), \dots, x_n(t_0)]$  no instante inicial  $t_0$ , e os sinais de entrada para  $t \geq t_0$ , são suficientes para determinar os valores futuros dos sinais de saída e das variáveis de estado.

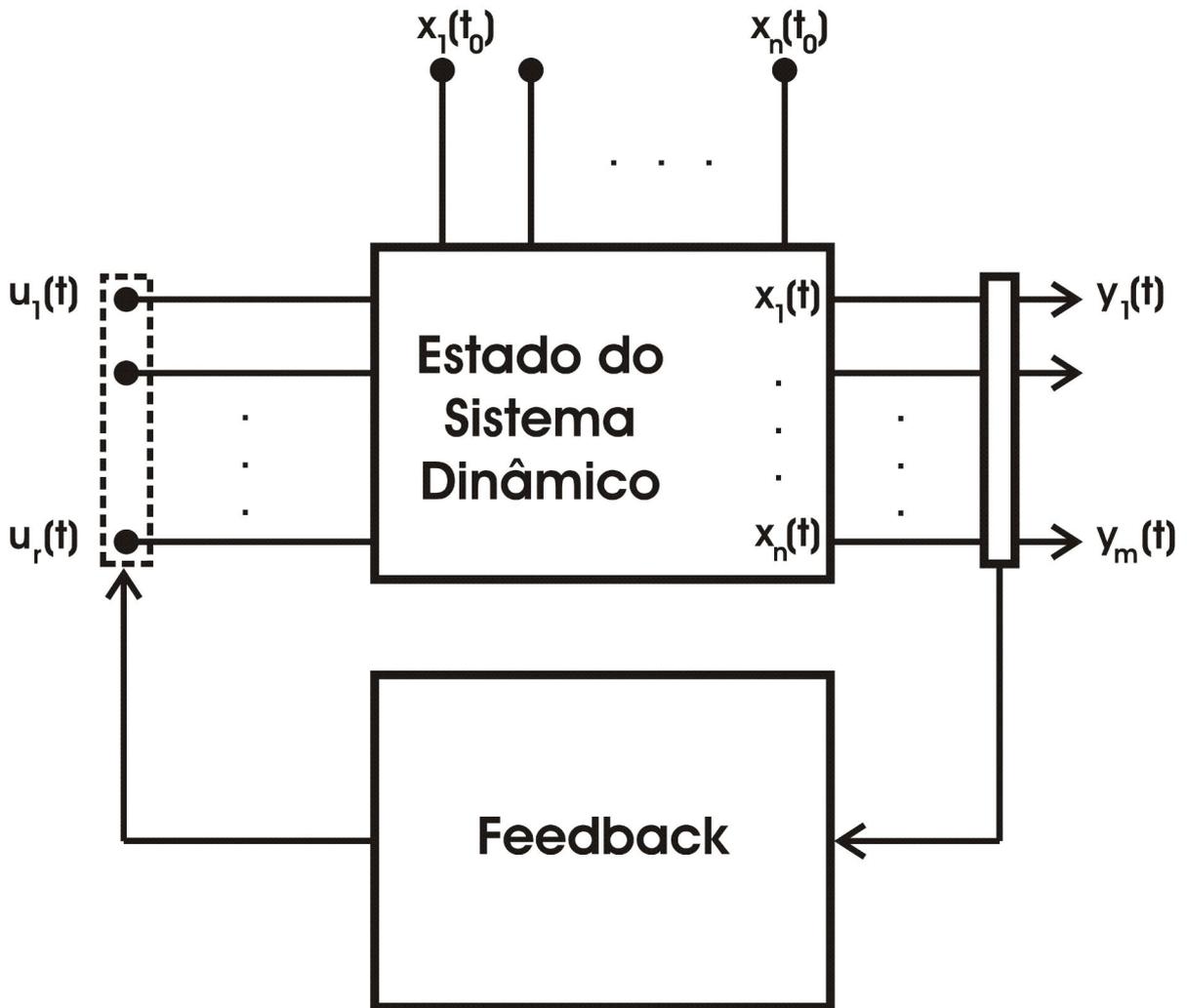


Figura 4 – As variáveis de estado de um sistema dinâmico

### 2.5.2 Classificação de um Sistema Dinâmico

Um sistema dinâmico é classificado quanto à variável temporal, ao tipo de modelo e quanto aos parâmetros<sup>6</sup>.

#### Um sistema pode ser discreto ou contínuo:

Quanto à variável temporal, um sistema pode ser classificado como discreto, se  $t$  assume apenas valores inteiros no intervalo.

<sup>6</sup> Cumpre observar que todo modelo procura reproduzir a dinâmica do sistema real em uma escala de tempo. Portanto, a escolha dessa escala de tempo influencia a validade de se assumir que algumas grandezas são parâmetros e que outras grandezas são variáveis. Normalmente, tomam-se como parâmetros aquelas grandezas que variam muito lentamente, em comparação com grandezas que têm uma variação rápida.

Para um sistema contínuo no tempo,  $t$  pode assumir qualquer valor real em um intervalo.

### **Um sistema pode ser linear ou não-linear:**

Quanto ao tipo de modelo, o sistema pode ser linear, se as equações são lineares nas variáveis dependentes ou suas equações diferenciais são lineares.

Já um sistema é não-linear se não pode ser escrito de uma das duas formas ditas anteriormente.

### **Um sistema pode ser a parâmetros concentrados ou a parâmetros distribuídos:**

- **Modelo de parâmetros concentrados (*lumped*):**

A dependência espacial é desprezada: as propriedades ou estados do sistema são considerados homogêneos em todo o volume de controle. Este tipo de modelo gera equações diferenciais ordinárias.

- **Modelo de parâmetros distribuídos:**

Leva-se em conta as variações espaciais no comportamento das variáveis. Este tipo de modelo gera equações diferenciais parciais. Todos os sistemas reais são distribuídos<sup>7</sup>. Neste caso, para se incluir características espaciais e temporais, devem-se usar equações diferenciais parciais ou série de estágios com parâmetros *lumped*.

---

<sup>7</sup> Sendo as variações espaciais desprezadas no circuito primário, o sistema estudado foi aproximado por um modelo *lumped*.

### 3 FUNDAMENTOS CONCEITUAIS

Ao longo da fase de projeto do reator IRIS, é de suma importância que sejam desenvolvidos códigos computacionais para dar suporte ao desenvolvimento dos sistemas de controle e instrumentação.

Os códigos de alta definição são demasiadamente lentos para este propósito, sendo necessário o desenvolvimento de modelos simplificados, de baixa definição e alta velocidade que permita uma rápida avaliação e comparação de diferentes cenários de controle e segurança.

Com o intuito de examinar todos os casos necessários, os modelos devem ser simples e de rápida execução. Modelos detalhados empregados na análise de acidentes são geralmente lentos para serem usados no desenvolvimento efetivo de sistemas de controle, mas podem ser usados para avaliações de referência do tipo *benchmark*.

A seguir, será feita uma descrição mais pormenorizada sobre cada uma das ferramentas de simulação para o reator IRIS.

#### 3.1 RELAP

Simuladores dinâmicos altamente detalhados vem sendo desenvolvidos para o IRIS, como aquele construído por Grgic (2003 apud CAMMI et al. 2005)<sup>8</sup>, que desenvolveu uma nodalização para o RELAP5. Tais simuladores, baseados em códigos de dinâmica de fluidos computacional altamente complexa como o RELAP, são perfeitamente apropriados para análise de acidentes e avaliações de segurança orientadas para características de projeto do reator. Por outro lado, devido à riqueza de detalhes envolvida, estes códigos não podem ser utilizados habilmente para simulações dinâmicas de controle: o tempo de execução de cada simulação pode durar muitas horas ou dias, o que o torna proibitivo para simulações repetitivas dos casos de transitórios necessários à otimização dos sistemas de controle e instrumentação em fase de projeto. Em vez disso, seu principal propósito é servir de referência e análises do tipo *benchmark*.

O RELAP5 é um modelo hidrodinâmico unidimensional para escoamento de

---

<sup>8</sup> GRGIC, D.; BAJIS, T.; ORIANI, L. **Development of RELAP5 nodalization for IRIS non-LOCA transient analyses**. In AMERICAN NUCLEAR SOCIETY TOPICAL MEETING IN MATHEMATICS & COMPUTATIONS (M&C), Gatlinburg, USA, 2003.

mistura bifásica água-vapor, sendo usado tanto para o circuito primário quanto para o circuito secundário, objetivando o estudo completo do comportamento termoidráulico da planta. O programa computa variáveis pertinentes da planta incluindo temperaturas, pressões e nível de potência. O código foi desenvolvido para análises de reatores a água leve. Assim, o código RELAP tem sido utilizado extensivamente em análises de reatores a água leve, e também tem sido empregado na análise de transitórios em projetos de reatores avançados da *Westinghouse*.

### 3.2 MODELICA

A linguagem MODELICA permite convenientemente a modelagem de componentes de sistemas físicos complexos. A organização *Modelica Association*, sem fins lucrativos, fornece a linguagem MODELICA, bibliotecas MODELICA e ferramentas de simulação MODELICA sem custo, mas é preciso um ambiente de desenvolvimento compatível com a utilização destes. A *Westinghouse* usa Dymola (Dynamic Modeling Laboratory), uma ferramenta completa para modelagem e simulação de sistemas integrados e complexos em MODELICA. Dymola fornece meios para desenvolver modelos MODELICA gráfica, textualmente, ou em combinações híbridas.

MODELICA é uma linguagem orientada a objetos cuja herança de recursos permitem ao usuário modificar o modelo, substituindo uma versão de uma classe para outra.

MODELICA trabalha com equações em vez de declarações de atribuição. O ambiente Dymola fornece ferramentas de álgebra computacional para manipular as equações de tal modo que permita a solução numérica conveniente. Isto alivia o programador de grande parte da carga normalmente associada com a transformação e ordenação de equações físicas em uma forma passível de integração numérica. Em contrapartida, infelizmente, isso também elimina a maior parte do controle do programador.

A combinação Dymola/MODELICA nem sempre encontra a solução desejada. Um agravante deste problema é que as instalações de depuração do Dymola não prestam uma assistência muito útil. O programador precisa resolver caso a caso os

problemas que surgem. Apesar destas dificuldades, a combinação Dymola/MODELICA fornece ao usuário a capacidade de desenvolver rapidamente diferentes versões do mesmo modelo, que variam em detalhe, permitindo ao usuário chegar a um equilíbrio razoável entre a velocidade de execução e os detalhes do modelo.

### 3.3 SIMULINK

O SIMULINK é um programa do MATLAB utilizado para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. O programa se aplica a sistemas lineares e não lineares, contínuos e/ou discretos no tempo.

SIMULINK é o resultado de uma longa evolução de pacotes de simulação anteriores que necessitavam a formulação de equações diferenciais ou de equações de diferenças em linguagens de programação. Inclui bibliotecas de blocos contendo fontes, visualizadores, componentes lineares e não-lineares, além de conectores, com a opção de criação ou personalização de blocos.

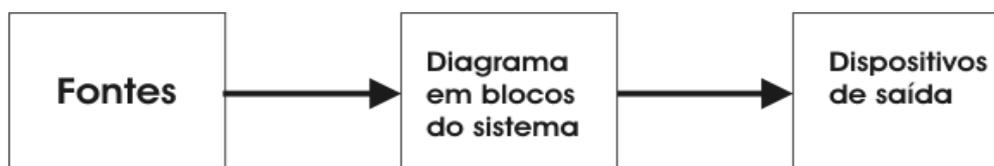
Após a definição do modelo, a simulação pode ser feita com diferentes algoritmos de resolução, escolhidos a partir dos menus do SIMULINK ou da linha de comando do MATLAB. Os menus são particularmente convenientes para o trabalho interativo, enquanto a linha de comando tem sua utilidade na simulação repetitiva a qual se deseja somente mudar parâmetros.

Usando osciloscópios (Scopes) ou outros visualizadores, têm-se o resultado gráfico da simulação enquanto esta está sendo executada. Os resultados da simulação podem ser exportados para o MATLAB para futuro processamento ou visualização.

As ferramentas de análise de modelos incluem ferramentas de linearização e ajuste (*Trimming*) que podem ser acessadas a partir da linha de comando do MATLAB, assim como várias ferramentas do MATLAB e suas *Toolboxes* específicas.

Sendo o MATLAB e o SIMULINK integrados, pode-se simular, analisar e revisar os modelos em qualquer dos dois ambientes.

Um modelo SIMULINK consiste de 3 tipos de componentes: fontes, o sistema a ser modelado e o dispositivo de saída (Figura 5).



*Figura 5 – Elementos de um modelo em SIMULINK*

O elemento central, o sistema, é a representação de um diagrama em blocos de um sistema dinâmico a ser modelado no SIMULINK.

As fontes são as entradas aplicadas ao sistema dinâmico. Podem incluir constantes, geradores de funções como senoides ou degrau, ou ainda sinais personalizados pelo usuário criados no MATLAB. São encontrados na biblioteca de fontes (*sources*).

A saída do sistema é entregue aos dispositivos de saída. Alguns exemplos são gráficos, osciloscópios e arquivos de saída. Tais blocos são encontrados na biblioteca de *Dispositivos de Saída*.

Frequentemente, em modelos SIMULINK um ou mais desses 3 elementos pode faltar. Por exemplo, pode-se desejar modelar o comportamento na ausência de forças de um sistema inicialmente fora de sua condição de equilíbrio. Tal modelo não deve ter entradas mas deve conter blocos de sistema, tais como ganho, integradores etc, e provavelmente dispositivos de saída. Também é possível construir modelos que possuem fontes e dispositivos de saída, mas nenhum bloco de sistema. Suponha por exemplo que se necessita de um sinal que seja composto da soma de vários outros sinais. Tais sinais podem facilmente ser gerados usando as fontes do SIMULINK e enviados ao MATLAB ou a um arquivo no disco rígido.

O SIMULINK fornece um ambiente de modelagem gráfica que inclui bibliotecas de blocos pré-definidos e um editor gráfico interativo para a montagem e gestão de diagramas de blocos muito intuitiva. Ele dá ao modelador a capacidade de gerenciar projetos complexos segmentando modelos em hierarquias de componentes do projeto. Como se vê, a chave mestra do ambiente SIMULINK é o caminho que permite o rápido desenvolvimento do modelo, enquanto a sua fraqueza reside na dificuldade de modelagem de sistemas extremamente complexos.

O modelo do IRIS em SIMULINK (MODIRIS) foi aqui desenvolvido não para análises detalhadas e de alta precisão. Os detalhes foram sacrificados em troca de

uma maior velocidade de execução e flexibilidade do modelo. Esta filosofia é evidenciada pelas simplificações assumidas no modelo.

A simplicidade do ambiente do SIMULINK facilita a modificação do modelo. O modelo desenvolvido é executado rapidamente, permitindo testar e comparar várias alternativas eficientemente.

### **3.4 Conceitos básicos sobre a operação de um reator PWR**

#### **3.4.1 Operação do reator**

As reações de fissão só tem utilidade em um reator quando a reação ocorre em uma massa de material fissionável.

Em um reator, nêutrons são perdidos por escape ou fugas de suas superfícies externas e fugas em materiais não combustíveis. Quanto maior o tamanho físico do reator, menor é a geração de nêutrons que escapam de suas cercanias. Se a reação for iniciada com uma pequena quantidade de combustível, tantos nêutrons serão perdidos através de fugas na superfície que a reação em cadeia não será possível.

Quando combustível adicional é acrescentado, a importância das fugas é reduzida até finalmente a um ponto em que o material fissionável presente seja o bastante para iniciar a reação em cadeia. Neste ponto, o sistema é dito tornar-se crítico e a quantidade de combustível é chamada de massa crítica<sup>9</sup>.

Quando o reator está crítico, a produção de nêutrons por fissão é exatamente balanceada pela perda de nêutrons através de vazamentos, absorção em combustível e absorção em todos os outros materiais presentes no reator.

Nesta condição a população de nêutrons no reator permanece constante ao longo do tempo e o mesmo é dito estar crítico.

Do mesmo modo, define-se que um reator é subcrítico quando a população de nêutrons no seu interior diminui de geração para geração. Por outro lado, diz-se que um reator é supercrítico quando a população de nêutrons no seu interior aumenta de geração para geração.

---

<sup>9</sup> Um reator apenas com a massa crítica perderia a capacidade de manter a reação em cadeia logo após as primeiras fissões provocassem a redução da massa de urânio. Assim, um excesso de combustível deverá ser adicionado ao reator. Este excesso de massa crítica deverá ser compensado pela introdução de uma quantidade adicional de material de controle. Esse material de controle adicional será retirado a medida que o combustível vai queimando.

Para tratar quantitativamente do estado em que se encontra o reator, define-se uma variável chamada reatividade ( $r$ ) que nos indica o quanto o reator está afastado da criticalidade. Desta maneira, tem-se:

- $r < 0$  para um reator subcrítico (população de nêutrons diminuindo ou reator desligado);
- $r = 0$  para um reator crítico (população de nêutrons constante);
- $r > 0$  para um reator supercrítico (população de nêutrons aumentando).

A primeira etapa da operação do reator para a geração de calor consiste em se obter a criticalidade partindo-se da condição do reator desligado, isto é subcrítico. A criticalidade ou massa crítica é obtida pela retirada de materiais absorvedores de nêutrons, que foram introduzidos no reator para impedir a reação em cadeia (desligar) quando desejado. Esses materiais são chamados materiais de controle.

Os materiais de controle são usados em três formas diferentes:

- a) Barras de controle: Barras contendo uma liga de Prata, Índio e Cádmiu, usadas para o controle fino e rápido de reatividade e para o desligamento;
- b) Veneno Solúvel (ácido bórico): dissolvido no refrigerante do reator, usado para controle lento e grosso da reatividade (compensação da queima do combustível);
- c) Veneno Queimável: barras contendo um vidro de borossilicato, usadas para compensação parcial automática da queima do combustível.

Quanto maior a população de nêutrons maior será a taxa de fissões, conseqüentemente maior a potência gerada; desta maneira, estando o reator crítico com baixa população de nêutrons, faz-se o reator supercrítico pela retirada de materiais de controle (introdução de reatividade positiva) a população neutrônica crescerá e com ela a potência.

Uma vez atingida a potência desejada faz-se o reator novamente crítico, pela introdução de reatividade negativa (introdução de material de controle) e desta maneira o reator permanecerá no novo nível de potência.

A redução da potência é feita pondo o reator subcrítico pela introdução de reatividade negativa (introdução de materiais de controle), a potência decrescerá até

o nível desejado quando então faz-se o reator novamente crítico.

Para o desligamento mantém-se o reator subcrítico até a redução da população neutrônica a um nível praticamente nulo. O desligamento será mais rápido se for introduzida maior reatividade negativa.

Para efeito de segurança o reator deve ser desligado por uma grande quantidade de reatividade negativa chamada de margem de desligamento.

Vários são os fatores que afetam a criticalidade do reator introduzindo reatividade negativa (ou positiva). Por razões de segurança, o reator é projetado de maneira que estes fatores atuem em oposição a variações de potência. Esta condição confere uma alta estabilidade ao reator facilitando o controle. Estes fatores são descritos em termos de coeficientes de reatividade, e alguns exemplos importantes são:

- coeficiente de temperatura do moderador;
- coeficiente de temperatura do combustível;
- coeficiente de vazios;
- coeficiente de potência.

Um outro fator importante que afeta a criticalidade do reator é o efeito chamado de envenenamento devido aos produtos de fissão, pois estes concorrem com o combustível na absorção de nêutrons (introduzindo reatividade negativa). Dentre eles o mais importante é o xenônio 135.

O Xe 135 é formado diretamente da fissão e pela transformação de outro produto de fissão (iodo).

Sendo o xenônio absorvedor de nêutrons ele deverá ser compensado pela retirada de material de controle (especialmente ácido bórico); esta situação gera redução da disponibilidade da Central quando se está no final do ciclo, onde a concentração de ácido bórico no refrigerante é baixa.

### **3.4.2 Sistema de Controle Químico e Volumétrico (SCQV) em um PWR**

O Sistema de Controle Químico e Volumétrico (SCQV) é projetado para fornecer os seguintes serviços ao Sistema de Refrigeração do Reator (SRR):

- a) Manter o nível programado de água no pressurizador;
- b) Manter o fluxo de água de selagem para as bombas de refrigerante do reator;
- c) Regular:

- As características químicas da água borada no Sistema de Refrigeração do Reator (SRR);
- O nível de radioatividade no SRR;
- A concentração de boro no SRR;
- A reposição de água borada no SRR.

d) Carregamento, drenagem e testes de pressão do SRR.

### **Variação da Concentração de boro**

Durante a operação do reator, são feitas variações na concentração do veneno solúvel (ácido bórico) para as seguintes operações:

a) Partida do reator

A concentração de boro deve ser reduzida para se obter a concentração crítica.

b) Variações de Carga

A concentração de boro deve ser aumentada ou diminuída para compensar os transitórios de xenônio que ocorrem após uma variação de carga.

c) Queima de Combustível

A concentração de boro deve ser diminuída para compensar a perda de reatividade devido a queima de combustível.

d) Desligamento Frio

A concentração de boro deve ser aumentada para a concentração de desligado-frio.

A concentração de ácido bórico no SRR é controlada pelo Sistema de Regeneração Térmica de Boro (SRTB) e pelo Sistema de Controle de Água de Reposição (SCAR). Este último sistema é também usado para manter o balanço adequado de refrigerante no SRR. Além disso, para os casos de boração ou reposição de emergência, há a possibilidade de fornecimento direto de água do tanque de recarregamento ou seja, a solução a 4% de ácido bórico para a sucção das bombas de carregamento. O ácido bórico é armazenado em dois tanques de ácido bórico. Os tanques são instalados em compartimento nos quais é mantida uma temperatura mínima de 18,3°C. A adição, remoção e recirculação de ácido bórico é feita através de duas bombas de transferência de ácido bórico. As bombas de transferência são do tipo blindada (*canned*), centrífuga de rotação constante. Uma

das bombas pode ser utilizada periodicamente para recircular o conteúdo dos tanques através dos filtros de ácido bórico. No caso de ocorrer o sinal de demanda do Sistema de Controle de Reposição de uma bomba (a que tiver sido previamente selecionada) parte e envia ácido bórico ao misturador de ácido bórico. A segunda bomba serve como reserva.

As bombas de água de reposição do reator, com sucção no tanque de água de reposição são empregadas para várias operações de reposição e lavagem do SCQV. Uma destas bombas também entra em operação com o sinal de demanda do Sistema de Controle de Água de Reposição e alimenta o misturador de ácido bórico, através de uma válvula controladora.

A vazão de ácido bórico da bomba de transferência de ácido bórico e a vazão de água de reposição são direcionadas ao misturador de ácido bórico. A mistura é levada então ao coletor de sucção das bombas de carregamento ou ao tanque de controle volumétrico através do bocal de spray. O caminho normal de reposição é através do coletor de sucção das bombas de carregamento. O caminho normal para diluição é através do tanque de controle volumétrico onde haverá a absorção de hidrogênio durante diluições demoradas. Em caso de necessidade de diluições rápidas devida a transitórios de xenônio, os dois caminhos referidos acima podem ser usados em paralelo.

### **3.5 Bases de projeto, descrição dos equipamentos e parâmetros de operação**

#### **Tanque de Dosagem de Ácido Bórico e Agitador**

O tanque de dosagem de ácido bórico é usado na preparação da solução a 4% em peso de ácido bórico. O tanque possui um *Steam Heated Jacket*, para aquecer a água de reposição do refrigerante do reator antes da introdução de ácido bórico em forma cristalizada.

#### **Bombas de Transferência de Ácido Bórico**

Duas bombas centrífugas, eixo horizontal, velocidade constante, do tipo *canned*.

A atuação manual ou automática do Sistema de Controle de Água de Reposição do Reator parte a bomba de transferência de ácido bórico, para fornecer

a reposição normal de ácido bórico em solução para o misturador de ácido bórico. Para a operação de boração de emergência, o fornecimento de solução de ácido bórico, 4% em peso, para a tubulação de sucção das bombas de carregamento pode ser feito partindo uma ou as duas bombas de transferência de ácido bórico. As bombas de transferência de ácido bórico são também utilizadas para transferir a solução de ácido bórico, preparada no tanque de dosagem, para os tanques de ácido bórico.

### **Tanques de Ácido Bórico**

O sistema possui dois tanques (capacidade de cada um 52.920 L). A capacidade combinada dos tanques é suficiente para conter ácido bórico necessário para as seguintes funções no Sistema de Refrigeração do Reator:

- a) Os dois tanques armazenam ácido bórico suficiente para as operações de recarregamento, mais ácido bórico suficiente para desligar o reator, para a condição desligado-frio com a barra de controle de maior valor fora do núcleo, imediatamente após o recarregamento;
- b) A capacidade de armazenamento de ácido bórico em cada tanque é suficiente para levar o reator à condição de desligado-frio com a barra de controle de maior valor retirada (presa) do reator.

### **Filtro de Ácido Bórico**

O filtro de ácido bórico é instalado para coletar partículas maiores que 25 microns contidas na solução de ácido bórico que estiver sendo bombeada para o misturador de ácido/água, para a linha de boração de emergência ou para o tanque de ácido bórico.

### **Misturador de Ácido/Água**

Fabricado em aço inoxidável austenítico, é dimensionado para assegurar uma perfeita mistura de ácido bórico, 4% em peso, com a água de reposição do refrigerante do reator quando necessário.

O misturador consiste de um tubo que envolve outro perfurado, por onde flui a solução de ácido bórico.

### **Operação Normal**

A um nível de potência constante, as vazões de carregamento e saída são determinados pelas necessidades de selagem das bombas de refrigeração do reator e da purificação normal do Sistema de Refrigeração do Reator. Uma bomba de carregamento é empregada e a vazão de carregamento é controlada automaticamente pelo sinal de nível do pressurizador. A única necessidade de ajuste na concentração de boro é para compensar a queima de combustível. Estes ajustes são feitos aproximadamente 2 vezes por semana para manter os grupos de barras de controle dentro dos limites permissíveis. Variações bruscas de potência são compensadas pelo movimento automático das barras de controle. Se ocorrer uma variação no nível de potência do reator e se o novo nível for mantido por muito tempo, pode ser necessário um novo ajuste na concentração de boro para preservar a margem de desligamento.

Em operação normal, a vazão de saída do SRR é 60 gpm (3,79 L/s) e um desmineralizador de leito misto é usado. Cerca de uma vez por turno são retiradas amostras do refrigerante para verificação da concentração de boro, qualidade da água, pH e nível de atividade. A vazão de carregamento do SRR é controlada automaticamente pelo nível do pressurizador através da válvula de controle no coletor de descarga das bombas de carregamento. Durante operação à potência constante, o Sistema de Controle de Água de Reposição do Reator é colocado em "AUTO" para repor vazamentos do SRR com água a uma concentração de boro idêntica à do SRR. A reposição é automaticamente iniciada se o nível do tanque de controle volumétrico cair abaixo do limite inferior da faixa de operação normal.

### **Sistema de Regeneração Térmica de Boro (SRTB)**

O Sistema de Regeneração Térmica de Boro (SRTB) varia a concentração de boro no SRR para compensar a reatividade associada aos transientes de xenônio e outras variações de reatividade que ocorrem quando varia a potência do reator.

### **Descrição geral**

O SRTB consiste basicamente de três desmineralizadores, um conjunto resfriador, trocadores de calor, válvulas e tubulações associadas.

O SCQV pode ser alimentado para permitir que a vazão de saída passe através do SRTB para provocar mudanças na concentração de boro permitindo

seguimento de variações de carga sem a utilização do Sistema de Reciclagem de Boro.

A vazão de saída é desviada, a jusante dos desmineralizadores de leite misto, para o SRTB. Após o processamento pelo SRTB o refrigerante retorna ao SCQV em um ponto a montante do filtro de refrigerante do reator, indo para o Tanque de Controle Volumétrico (TCV).

A retenção e liberação de boro na resina dos desmineralizadores durante operações de seguimento de carga é determinada pela temperatura do refrigerante na entrada dos desmineralizadores.

Um grupo de trocadores de calor e a unidade de resfriamento controlam as temperaturas do refrigerante na entrada dos desmineralizadores tanto para retenção como para liberação de boro do sistema.

O SRTB é alinhado de um modo para a retenção (diluição do SRR) e de outro para a liberação (boração do SRR) de boro.

Abaixo segue a descrição sucinta desses dois modos de operação.

### **Diluição (Deboração)**

Durante esta fase a vazão de saída passa pelo trocador de calor do conjunto resfriador. Estes dois trocadores de calor resfriam a vazão da saída antes da admissão nos desmineralizadores.

O trocador de calor reaquecedor da saída fica sem a fonte quente e não tem função durante operação de diluição. A temperatura do refrigerante na entrada dos desmineralizadores é controlada automaticamente pela válvula de controle de temperatura que controla a vazão de água gelada do lado da carcaça do trocador de calor do conjunto resfriador.

Esta válvula é controlada por um termopar instalado entre o trocador de calor do reauecedor de saída e os desmineralizadores.

A válvula a montante dos desmineralizadores é modulada manualmente da sala de controle, fazendo com que parte do fluido passe pelos desmineralizadores, (de cima para baixo) onde boro é retido. Após a passagem pelos desmineralizadores esta parte do fluido se junta ao restante (que não passou pelas resinas), indo para o lado da carcaça do trocador de calor moderante onde é aquecido pelo fluido de saída que está entrando no SRTB.

Após o trocador de calor moderante o refrigerante processado pelo SRTB é

devolvido ao SCQV a montante do filtro de refrigerante do reator, onde seguirá o caminho normal.

Dessa forma através da retenção de boro nas resinas, um decréscimo na concentração de boro no SRR é obtido, pelo envio de parte do fluido de saída do SRR a relativamente baixas temperaturas, 10°C, aos desmineralizadores do SRTB.

O controle da quantidade de boro a ser retirada nas resinas é feito através do controle da vazão pelos desmineralizadores.

### **Boração**

Na fase de liberação de boro para o SRR o fluxo da linha de saída passa pelos tubos do trocador de calor moderante, é desviada do trocador do resfriador e flui através da carcaça do trocador de calor do reaquecedor de saída.

Os trocadores de calor moderante e o reaquecedor da saída, aquecem a vazão da saída antes de entrar nas camadas de resinas.

A temperatura do fluido na entrada dos desmineralizadores é controlada por ajuste da vazão nos tubos do trocador de calor reaquecedor.

As válvulas de controle de temperatura recebem sinal de temperatura do termopar localizado entre os desmineralizadores e o trocador de calor reaquecedor da saída.

Após passar pelos desmineralizadores, a vazão de saída entra no lado da carcaça do trocador de calor moderante, passa pelos tubos do resfriador da saída retornando ao SCQV a montante do filtro de refrigerante do reator.

Da mesma forma que na diluição, através da modulação da válvula, parte do fluido passa pelos desmineralizadores (de baixo para cima), onde boro é liberado e parte é enviada diretamente para o trocador moderante, sendo controlada a borração através da vazão do fluido de saída pelas resinas.

A temperatura na entrada do tanque de controle volumétrico é controlada automaticamente por ajuste da vazão do fluido frio do trocador de calor do resfriador da saída; para isto a válvula recebe sinal do termopar instalado na linha que vai ao SCQV.

Desta forma, no caso de liberação de boro das resinas, pode-se aumentar a concentração de boro no refrigerante enviando-se a vazão da saída a temperatura relativamente altas (60°C) aos desmineralizadores do SRTB. Nos desmineralizadores a água quente faz com que o boro anteriormente retido nas

resinas seja liberado e enviado ao Sistema de Refrigeração do Reator, via SCQV.

O reaquecedor da saída aquece o fluido de saída até a temperatura desejada para a operação de liberação de boro. Este trocador de calor é do tipo regenerativo no qual a fonte de calor é o fluido desviado da linha de saída (*letdown*) em um ponto antes do trocador de calor da saída.

Durante a operação de retenção de boro nas resinas dos desmineralizadores a vazão através do lado da carcaça do reaquecedor da saída é isolada.

Para retenção de boro nas resinas o refrigerante frio flui através do desmineralizador no sentido de cima para baixo.

Para a liberação de boro das resinas o refrigerante quente flui de baixo para cima. A inversão do sentido de escoamento do refrigerante é feita através de operação de uma chave seletora que automaticamente alinha o SRTB para operações de diluição e boração do SRR. Observe que a atuação nesta chave alinha o sistema, mas a modulação (manual) da válvula é que vai controlar a taxa de boração ou diluição.

Em boração ou diluição, a válvula do SCQV irá fechar quando colocada na posição auto, abrindo quando o SRTB estiver fora de serviço.

A capacidade do Sistema de Regeneração Térmica de Boro de variar a concentração de boro no SRR de um valor definido decresce durante a vida do núcleo (ciclo de combustível).

Devido a esta condição o SRTB<sup>10</sup> é projetado considerando-se o último período no ciclo de combustível para o qual a operação de seguimento de carga é garantida.

### **3.6 Sistema de Injeção de Segurança (SIS) em um PWR**

O SIS atua em três fases distintas: fase de injeção, fase de re-circulação pela perna fria e fase de re-circulação pela perna quente.

#### **Fase de Injeção**

Nesta fase, água borada vinda do TAR (Tanque de Água de Recarregamento)

---

<sup>10</sup> Embora o SRTB seja basicamente projetado para compensar os transitórios de xenônio que ocorrem durante variações de potência do reator, o sistema pode também ser usado para promover variações na concentração de boro que excedam a capacidade de projeto dos desmineralizadores com regeneração térmica.

e dos acumuladores é injetada nas pernas frias do SRR (Sistema de Refrigeração do Reator) e diretamente no vaso do reator via TIB (Tanque de Injeção de Boro). O objetivo neste caso é minimizar ou prevenir maiores danos ao núcleo.

### **Fase de Re-circulação pela Perna Fria**

Nesta fase água borada é re-circulada do poço do EC (Envoltório de Contenção) de volta às pernas frias do SRR e vaso do reator. O objetivo é remover o calor de decaimento do núcleo do reator.

### **Fase de Re-circulação pela Perna Quente**

Nesta fase a re-circulação se faz das pernas quentes do SRR para as pernas frias, visando estabelecer e manter o núcleo em uma condição sub-resfriada o quanto seja necessário.

No caso de um acidente de Ruptura da Linha Principal de Vapor (RLPV), haveria um resfriamento brusco do SRR, o que levaria, devido ao coeficiente negativo do moderador, ao aumento de reatividade positiva no núcleo. A atuação do SIS neste caso se daria pela inserção de reatividade negativa pela injeção de água borada no SRR.

## **3.6.1 Descrição dos Principais Componentes do SIS**

### **3.6.1.1 Tanque de Injeção de Boro (TIB)**

O TIB é conectado nas linhas de injeção nas pernas frias no lado da descarga das bombas do SIS. O Tanque contém nominalmente 21000 ppm de ácido bórico e é requerido para adequada inserção de reatividade negativa no caso de uma quebra na linha principal de vapor. A descarga das bombas do SIS fornece a pressão necessária para injetar a solução de ácido bórico no SRR.

Conexões de entrada e saída do tanque de surto do tanque de injeção de boro asseguram contínua re-circulação dos 21000ppm de ácido bórico através do tanque, forçados pelas bombas de re-circulação de injeção de boro para assegurar que o conteúdo de boro no tanque de injeção permaneça dentro dos limites das

especificações técnicas. O TIB possui um sistema redundante de aquecedores e aquecimento de linha para assegurar que a solução armazenada esteja em uma temperatura acima do limite de cristalização do boro, a qual é de 54,4°C (130°F) a uma concentração de 21.000 ppm de boro. A Figura 6 (SANTOS, 1999) apresenta a curva de solubilidade do boro.

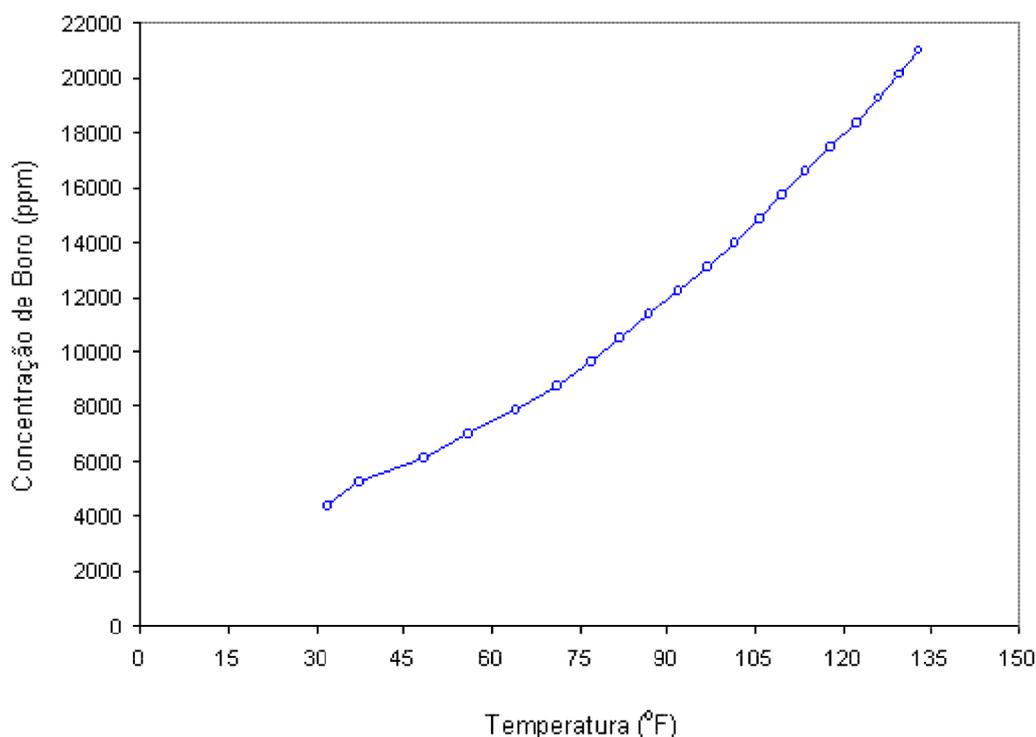


Figura 6 – Limite de solubilidade de soluções de ácido bórico (SANTOS, 1999)

O Tanque de Injeção de Boro tem dois detetores de temperatura. Ambos fornecem indicações para o controle dos aquecedores e alarme na sala de controle.

### 3.6.1.2 Tanque de Água de Recarregamento (TAR)

O TAR contém água borada a 20.000 ppm e sua capacidade é de 285.000 galões (1078,84 m<sup>3</sup>). Esta quantidade de água é suficiente para encher o canal de recarregamento, o que assegura:

- Volume suficiente para encher o vaso do reator acima dos bocais.
- Volume de água borada para assegurar 5%  $\Delta k/k$  de reatividade para o desligamento do reator com todas as barras inseridas, exceto a de maior reatividade.
- Suficiente volume de água no poço do EC para passar para a fase de recirculação.

### **3.6.1.3 Tanque de Surto do TIB**

Este tanque atua como um tanque elevado para a sucção das bombas de re-circulação de injeção de boro. O tanque contém ácido bórico a 12% em peso e possui dois transmissores de nível, um aquecedor, um agitador e um detetor de temperatura.

### **3.6.1.4 Acumuladores**

Os acumuladores são vasos pressurizados com aproximadamente 37.375 L de água com ácido bórico a 2% (20.000 ppm) em peso e pressurizados com nitrogênio. Durante operação normal, cada acumulador é isolado do SRR por duas válvulas de retenção em série. Se a pressão do SRR cai abaixo da pressão dos acumuladores, água borada será forçada para dentro do SRR.

Os acumuladores são dispositivos específicos de segurança “passivos”, porque uma cobertura de gás força a injeção. Não é necessário fonte de potência externa ou transmissão de sinal para se obter ação rápida e alta capacidade de fluxo quando necessário. Um acumulador é conectado a cada perna fria do SRR.

Verificações periódicas da concentração de boro são feitas através do sistema de amostragem. Variações na concentração de boro podem ocorrer devido a vazamentos na válvula para dentro dos acumuladores. A concentração pode ser corrigida drenando-se parte do conteúdo do acumulador para o TAR e, simultaneamente, alimentando o acumulador com água do mesmo tanque, usando uma bomba de injeção de segurança para bombear água borada para o acumulador através da linha de enchimento.

A drenagem de um acumulador para manutenção é feita inserindo-se um carretel na linha de dreno, o que permite às bombas de dreno do refrigerante bombear o conteúdo do acumulador para o tanque de espera de reciclagem.

### **3.6.1.5 Bombas de Injeção de Segurança (BIS)**

As bombas de injeção de segurança succionam das seguintes fontes:

- TAR, para injeção de segurança;
- Tubulação de descarga das bombas do sistema de remoção de calor residual, para re-circulação após acidente.

Duas bombas de alta pressão e de alto fluxo são providos para descarregar água borada (a alta pressão) para o SRR.

A pressão de descarga das bombas é ligeiramente inferior à pressão de operação do SRR para evitar injeção inadvertida durante operação normal. As bombas são do tipo centrífugas, horizontais, movidas por motor elétrico. As partes das bombas em contato com água borada são de aço inoxidável ou equivalente. Um orifício de desvio ("bypass") mínimo é provido na descarga de cada bomba para re-circulação.

Quando um sinal de segurança é recebido, as bombas partem e succionam do TAR para injetar água borada no SRR através do TIB.

#### **3.6.1.6 Bombas do Sistema de Remoção de Calor Residual (BSRCR)**

As bombas do SRCR succionam das seguintes fontes:

- Pernas quentes, durante resfriamento normal;
- TAR, durante injeção de segurança;
- Poço coletor do EC, durante re-circulação após acidente.

As bombas são do tipo centrífuga e são movidas por motor elétrico. Quando um sinal de injeção de segurança é recebido, as bombas partem succionando do TAR e operam nas condições de fluxo mínimo, até que a pressão do SRR seja reduzida suficientemente para injeção.

#### **3.6.1.7 Bombas de Recirculação de Injeção de Boro (BRIB)**

As bombas de re-circulação de injeção de boro circulam ácido bórico a 21000 ppm entre o Tanque de Surto e o TIB para assegurar que o conteúdo de boro no tanque de injeção permaneça dentro dos limites das especificações técnicas.

As bombas são do tipo centrífuga blindadas (*canned*). Têm partida manual e param com um sinal "S". Uma das bombas opera continuamente durante operação normal.

#### **3.6.1.8 Tubulação**

A tubulação do sistema é toda de aço inoxidável. Todas as junções e conexões são soldadas, exceto quando conexões flangeadas são requeridas para facilitar a remoção de equipamentos para a manutenção ou teste hidrostático.

Tubulações, válvulas, equipamentos e instrumentação de campo que normalmente contêm solução de ácido bórico concentrado, são aquecidos eletricamente para garantir a solubilidade do ácido bórico.

### 3.6.1.9 Válvulas

Todas as válvulas em contato com água borada são de aço inoxidável austenítico<sup>11</sup> ou equivalente.

Válvulas de alívio são colocadas em linhas e equipamentos que podem ser pressurizados acima da pressão de projeto por operação imprópria ou mau funcionamento de um componente.

## 3.7 Sistema de Injeção de Segurança no IRIS

O sistema de boração de emergência (EBS - *Emergence Boration System*) proporciona limitado sistema de refrigeração do reator (RCS - *Reactor Coolant System*) e fornece água borada suficiente para o controle de reatividade do núcleo durante transitórios ou acidentes quando o fornecimento normal do RCS oriundo dos sistemas de controle de volume e químico (CVCS – *Chemical and Volume Control Systems*) não está disponível ou é insuficiente.

Há dois tanques de boração de emergência (EBT – *Emergence Boration Tank*) localizados dentro do vaso de contenção a uma elevação acima das conexões com as tubulações (linha DVI – *Direct Vessel Injection*) ao vaso do reator. Cada tanque, cheio com água borada, possui uma linha de injeção conectada a uma das duas linhas DVI no *downcomer*. Cada tanque conecta-se também ao reator por uma linha de balanço de pressão que vem da porção superior do vaso do reator até o topo do EBT. A válvula de isolamento na linha de balanço de pressão está normalmente aberta para manter o EBS cheio de água à pressão do RCS.

Estes tanques são dimensionados para fornecer água borada em quantidade suficiente de modo a permitir que o reator atinja as condições de “desligamento” frio seguindo todos os eventos não-LOCA postulados. Um esquema simplificado do EBS e os outros sistemas de segurança do IRIS é mostrado na Figura 7

---

<sup>11</sup>Os aços inoxidáveis austeníticos constituem uma família com aplicação muito ampla, tais como: na indústria química, alimentícia, farmacêutica, biotecnologia, bioengenharia e nuclear entre outras. Em todas estas aplicações, a excepcional resistência à corrosão é a principal propriedade exigida destes aços.

(WESTINGHOUSE, 2003c).

Durante a operação normal, os dois EBTs são mantidos completamente cheios de água borada, fria, à pressão do RCS. A linha de descarga da parte inferior de cada um EBT para o vaso do reator é isolado por duas válvulas de isolamento paralelo normalmente fechadas. Uma linha normalmente aberta a partir do vaso do reator é ligado à parte superior de cada EBT. Estes tanques são monitorados para assegurar que a sua concentração de boro está dentro das especificações técnicas.

Na sequência de um desligamento, a atuação do EBS não ocorre enquanto o controle normal do RCS é mantido. EBTs contêm água borada suficiente para fornecer água ao RCS para um desligamento frio a partir de temperaturas elevadas. Os EBTs em conjunto com o grande vaso do reator dispõe de tempo suficiente para a restauração da composição e funções normais de remoção de calor.

Na sequência de eventos não-LOCA, onde o sistema primário é resfriado, como parte da resposta transitória ou de eventual recuperação, o resfriamento reduz a margem de desligamento do núcleo (*shutdown*) devido ao coeficiente de temperatura negativo do moderador, e uma excursão de potência é possível. O EBS, após esses eventos, fornece água borada suficiente para impedir um transitório na reatividade e manter o núcleo no estado “desligado”, assumindo que o RCCA (*Rod Cluster Control Assembly*) mais reativo é atingido em sua posição totalmente retirado do núcleo.

Durante uma ruptura do tubo do gerador de vapor, o vapor do SG (*Steam Generator*) e as linhas de alimentação de água afetadas são isolados para finalizar e limitar a perda do RCS. Caso o CVCS e os meios normais de remoção do calor de decaimento do núcleo não estiverem disponíveis, a injeção vinda do EBS mantém o RCS e fornece boração para o RCS, enquanto o EHRS (*Emergency Heat Removal System*) fornece a remoção de calor.

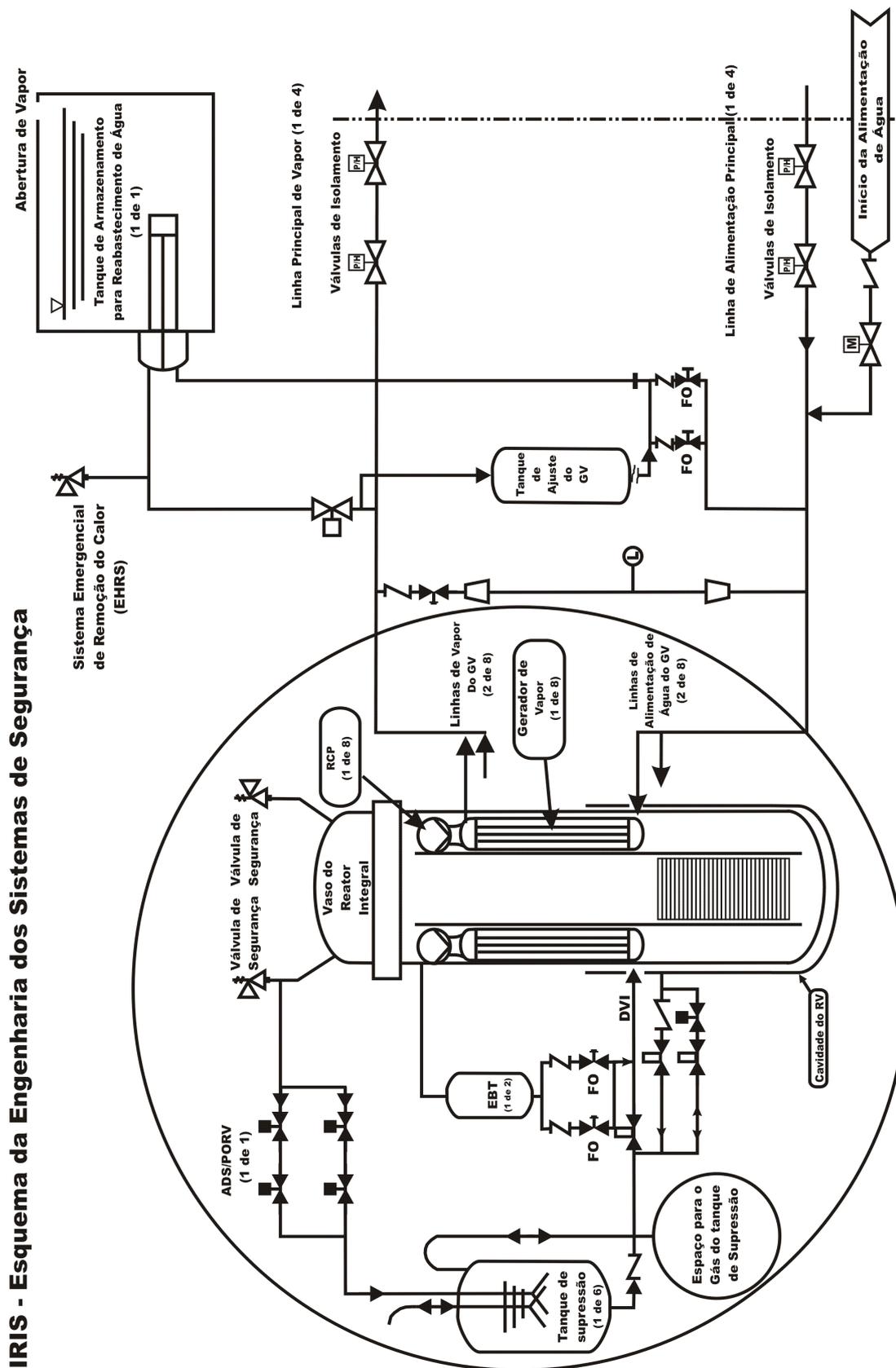


Figura 7 – Visão esquemática dos sistemas de segurança do IRIS

(WESTINGHOUSE, 2003c)

## 4 METODOLOGIA

Um reator nuclear é um sistema dinâmico de alta complexidade. Seus componentes encontram-se interconectados e interagindo dinamicamente. Como o reator IRIS encontra-se ainda em fase de projeto, devem-se desenvolver ferramentas para analisar seu comportamento dinâmico diante das mais diversas situações. Com esse intuito, foi adotado um modelo matemático contínuo, linear e a parâmetros concentrados.

Desse modo, serão obtidas equações diferenciais ordinárias que têm origem no estudo do balanço termohidráulico dos circuitos primário e secundário do IRIS, além das equações de balanço neutrônico.

Em seguida, estas equações matemáticas representativas da dinâmica do sistema serão transformadas para seus correspondentes modelos em SIMULINK: cada equação (ou conjunto delas) modelada em SIMULINK, corresponderá a um dos componentes do reator, sendo agora representados por blocos no ambiente do SIMULINK.

Em seguida, cada bloco componente do IRIS será interconectado, formando a estrutura completa do reator.

Tendo o modelo completo em SIMULINK, serão feitos estudos de transitórios de concentração de boro (boração e deboração) no circuito primário.

### 4.1 Modelo Matemático

A estratégia de modelagem matemática adotada para a simulação do sistema primário e secundário do IRIS foi a solução de um sistema de equações diferenciais ordinárias de balanço termohidráulico e neutrônico.

Os componentes modelados são o núcleo, o plenum superior e o plenum inferior, a bomba do refrigerante, o gerador de vapor e a válvula de admissão da turbina (TAV). Tanto a bomba quanto o gerador de vapor representam o comportamento completo dos oito componentes correspondentes. Assumiu-se que a pressão no circuito primário é constante. O *riser* e o *downcomer* são simulados simplesmente como um *delay* de transmissão de fronteira térmica.

As condições de contorno do modelo são a pressão do sistema no circuito

primário, a taxa média do fluxo do *feedwater* e a abertura da TAV no lado secundário.

A seguir, serão apresentados de modo mais detalhado, cada um dos componentes modelados e suas respectivas hipóteses simplificadoras.

#### **Núcleo do reator:**

Uma cinética pontual foi admitida, sendo adotado um grupo de nêutrons atrasados. Foi adotado um modelo de transferência de calor em uma dimensão (radial) tanto para a condução térmica no combustível quanto para os termos de convecção do fluido.

#### **As regiões do Riser e do Downcomer:**

Um simples termo de *delay* representa o comportamento de cada volume, i.e. uma transmissão tipo pistão da fronteira de temperatura foi assumida.

#### **Plena do reator:**

Foi adotada uma aproximação de volume de mistura, com uma mistura térmica completa do fluxo de entrada no volume com o fluido residente a cada instante de tempo tanto no plenum inferior quanto no plenum superior.

#### **Bomba:**

Uma curva de vazão mássica versus densidade do fluido representa o comportamento da bomba.

#### **Gerador de Vapor:**

O componente é simulado via uma equação de balanço de energia no lado primário, enquanto no secundário há três regiões: uma para o líquido sub-resfriado, outra para a zona bifásica e uma superaquecida. Para as três regiões foram adotadas fronteiras móveis.

#### **Válvula de Admissão da Turbina (TAV):**

Uma simples equação linear de queda da pressão de vapor é admitida.

Nas próximas seções serão apresentados os resultados do desenvolvimento de cada uma das equações matemáticas para cada um dos componentes citados.

### **4.2 Modelo Neutrônico**

Uma cinética pontual, com um grupo de nêutrons atrasados, é admitida. Dois

*feedbacks* neutrônicos principais são modelados: o efeito Doppler do combustível e o efeito da temperatura do moderador.

As equações da cinética pontual e as equações dos precursores, ambas deduzidas no Anexo A, são, respectivamente:

$$\frac{dn}{dt} = \left( \frac{r-\beta}{\Lambda} \right) \cdot n + \lambda \cdot C \quad (1)$$

$$\frac{dC}{dt} = \left( \frac{\beta}{\Lambda} \right) \cdot n - \lambda \cdot C \quad (2)$$

em que:

$n$  é a densidade de nêutrons (nêutrons/m<sup>3</sup>).

$r$  é a reatividade total (pcm).

$\beta$  é a fração total de nêutrons atrasados (pcm).

$\Lambda$  é o tempo médio de geração entre o nascimento de nêutrons e a subsequente absorção induzindo fissão (s).

$\lambda$  é a constante de decaimento dos precursores de nêutrons atrasados (s<sup>-1</sup>).

$C$  é a concentração dos precursores de nêutrons atrasados (átomos/m<sup>3</sup>).

Os *feedbacks* neutrônicos na reatividade são definidos como uma função linear da temperatura do combustível e da temperatura do moderador:

$$r_f = \alpha_f (T_f - T_{f0}) \quad (3)$$

$$r_c = \alpha_c (T_c - T_{c0}) \quad (4)$$

em que:

$\alpha_f$  é o coeficiente de temperatura da reatividade do combustível (pcm/K).

$\alpha_c$  é o coeficiente de temperatura da reatividade do moderador (pcm/K).

$T_f$  é a temperatura média do combustível (°C).

$T_c$  é a temperatura média do moderador (°C).

$T_{f0}$  é a temperatura média de referência do combustível (°C).

$T_{c0}$  é a temperatura média de referência do moderador (°C).

A reatividade devida ao boro é uma função linear da concentração de ácido bórico no refrigerante:

$$r_B = \alpha_B (\kappa - \kappa_0) \quad (5)$$

em que:

$\alpha_B$  é o valor do coeficiente de reatividade do boro (pcm/ppm).

$\kappa$  é concentração de boro (ppm).

$\kappa_0$  é concentração inicial de boro (ppm).

A reatividade devida às barras de controle é uma função da altura de inserção  $\xi$ :

$$r_\zeta = f(\xi) \quad (6)$$

em que:

$f(\xi)$  é uma função da altura de inserção das barras de controle(m).

Desse modo, a reatividade total é dada por:

$$r = \alpha_B (\kappa - \kappa_0) + f(\xi) + \alpha_f (T_f - T_{f0}) + \alpha_c (T_c - T_{c0}) \quad (7)$$

$T_f$  e  $T_c$  na equação acima são as temperaturas do combustível e do refrigerante obtidas do modelo termoidrúlico.

### 4.3 Modelo Termoidrúlico

Os detalhes sobre a dedução das equações do modelo termoidrúlico podem ser encontrados no Apêndice A.

#### 4.3.1 Plenum inferior do vaso

Admitindo uma mistura térmica perfeita, obtém-se:

$$\frac{dT_{ip}}{dt} = \frac{Q_p}{m_{lp}} (T_{ip} - T_{lp}) \quad (8)$$

na equação acima:

$T_{ip}$  é a temperatura na entrada do plenum (°C).

$T_{lp}$  é a temperatura do fluido residente no plenum (°C).

$Q_p$  é a vazão mássica da bomba do primário (kg/s).

$m_{lp}$  é a massa de água residente no plenum inferior (kg).

#### 4.3.2 Núcleo do reator

O combustível é um modelo a parâmetros concentrados (*lumped*). O balanço de energia será:

$$\frac{dT_f}{dt} = \frac{P}{m_f c_f} - \frac{P_0}{m_f c_f} \left( \frac{T_f - T_c}{T_{f0} - T_{c0}} \right) \quad (9)$$

Sendo  $T_{ex}$  a temperatura do moderador na saída do núcleo, a temperatura do refrigerante  $T_c$  é definida como o valor médio:

$$T_c = \frac{T_{ex} + T_{lp}}{2} \quad (10)$$

Dessa maneira, o balanço de energia será:

$$\frac{dT_{ex}}{dt} = \frac{2P_0}{m_c c_c} \left( \frac{T_f - T_c}{T_{f0} - T_{c0}} \right) - \frac{4Q_p}{m_c} (T_c - T_{lp}) - \frac{Q_p}{m_{lp}} (T_{ip} - T_{lp}) \quad (11)$$

em que:

$m_f$  é a massa de combustível estimada (kg).

$m_c$  é a massa do refrigerante residente no núcleo (kg).

$c_f$  é o calor específico do combustível (kJ/kg K)<sup>12</sup>.

$P, P_0$  são, respectivamente, a potência térmica do núcleo no tempo t e o valor de referência (kW).

#### 4.3.3 Plenum superior do vaso

A mesma equação concernente ao plenum inferior aplica-se ao plenum superior:

$$\frac{dT_o}{dt} = \frac{Q_p}{m_o} (T_{ex} - T_o) \quad (12)$$

<sup>12</sup> Cumpre observar que o calor específico varia com a temperatura. Assim, sempre que o calor específico for citado no texto, estará subentendido que o calor específico médio constante no intervalo de temperatura considerado será empregado.

em que:

$T_o$  é a temperatura do fluido residente no plenum (°C).

$m_o$  é a massa do fluido residente no plenum (kg).

#### 4.3.4 Bomba do refrigerante do reator

A dinâmica da vazão mássica da bomba depende da constante de tempo característica de bomba:

$$\frac{dQ_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (Q_{p0} - Q_p) \quad (13)$$

em que:

$Q_{p0}$  é a vazão mássica de referência para um ponto fixo(kg/s).

$\tau_p$  é a constante de tempo característica de bomba (s).

#### 4.3.5 Transferência de Calor para o Gerador de Vapor

##### Primário do Gerador de Vapor

$$m_w c_w \frac{dT_p}{dt} = Q_p c_w (T_{SG1} - T_{SG0}) - W \quad (14)$$

em que:

$m_w$  é a massa de fluido na zona primária do gerador de vapor (kg).

$c_w$  é o calor específico do fluido (kJ/kg K).

$T_{SG1}$  é a temperatura na entrada do fluido do primário do Gerador de Vapor (GV) (°C).

$T_p$  é a temperatura do primário do Gerador de Vapor (°C)

$T_{SG0}$  é a temperatura na saída do fluido do primário do Gerador de Vapor (GV) (°C).

$W$  é a potência térmica trocada (kW).

De acordo com as hipóteses sobre o *delay* do *riser* e do *downcomer*,  $T_{SG1}$  é igual a  $T_o$  retardado e  $T_{SG0}$  é igual  $T_{ip}$  retardado.

## Secundário do Gerador de Vapor

Um modelo de fronteiras móveis para o secundário do SG requer a definição de duas fronteiras (a fronteira líquido-vapor e a fronteira vapor-vapor superaquecido) e daí três regiões (sub-resfriada, bifásica e superaquecida) e seus comprimentos correspondentes  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$ . As correspondentes equações de balanço são como segue abaixo.

Os detalhes sobre a dedução das equações do modelo termohidráulico do secundário dos geradores de vapor podem ser encontrados no Apêndice B.

### 1. Região Sub-resfriada

A equação de balanço de massa é dada por:

$$\int_0^{L_1} \left( \frac{\partial(A\rho)}{\partial t} \right) dz + \int_0^{L_1} \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial z} \right) dz = 0 \quad (15)$$

Aplicando a regra de Leibnitz (ver nota de rodapé da página 141) à primeira integral e integrando a segunda, fica:

$$A \frac{d}{dt} \int_0^{L_1} \rho dz - A \rho(L_1) \frac{dL_1}{dt} + \dot{m}_{12} - \dot{m}_m = 0 \quad (16)$$

Equação de balanço de energia:

$$\int_0^{L_1} \left( \frac{\partial(A\rho h - A p)}{\partial t} \right) dz + \int_0^{L_1} \left( \frac{\partial(\dot{m} h)}{\partial z} \right) dz = 0 \quad (17)$$

Aplicando a regra de Leibnitz à primeira integral e integrando a segunda, fica:

$$A \frac{d}{dt} \int_0^{L_1} \rho h dz - A \rho(L_1) h_l \frac{dL_1}{dt} - A L_1 \frac{dp}{dt} + \dot{m}_{12} h_l - \dot{m}_m h_m = W_1 \quad (18)$$

em que:

$W_1$  é a potência térmica trocada na região subresfriada (kW).

### 2. Região Bifásica

Integrando as equações de balanço para a região dada e aplicando a regra de Leibnitz, obtém-se:

*Balanco de massa:*

$$A \left[ \frac{d}{dt} \int_{L_1}^{L_1+L_2} \rho dz + \rho(L_1) \frac{dL_1}{dt} - \rho(L_1+L_2) \frac{d(L_1+L_2)}{dt} \right] = \dot{m}_{12} - \dot{m}_{23} \quad (19)$$

*Balanco de energia:*

$$A \frac{d}{dt} \int_{L_1}^{L_1+L_2} \rho h dz + A \rho(L_1) h_l \frac{dL_1}{dt} - A \rho(L_1+L_2) h_v \frac{d(L_1+L_2)}{dt} + \\ - A L_2 \frac{dp}{dt} + \dot{m}_{12} h_l - \dot{m}_{in} h_{in} = W_2 \quad (20)$$

em que:

$W_2$  é a potência térmica trocada na região bifásica (kW).

### 3. Região Superaquecida

Integrando as equações de balanço para a região dada e aplicando a regra de Leibnitz, obtém-se:

*Balanco de massa:*

$$A \left[ \frac{d}{dt} \int_{L_1+L_2}^L \rho dz + \rho(L_1+L_2) \frac{d(L_1+L_2)}{dt} \right] = \dot{m}_{23} - \dot{m}_{out} \quad (21)$$

*Balanco de energia:*

$$A \frac{d}{dt} \int_{L_1+L_2}^L \rho h dz + A \rho(L_1+L_2) h_v \frac{d(L_1+L_2)}{dt} - A L_3 \frac{dp}{dt} + \\ + \dot{m}_{out} h_{out} - \dot{m}_{23} h_v = W_3 \quad (22)$$

em que:

$W_3$  é a potência térmica trocada na região superaquecida (kW).

Admitindo P e T como variáveis de estado, os valores médios das temperaturas nas regiões *sub-resfriada* e *superaquecida* são definidas como sendo:

$$T_1 = \left( \frac{T_{in} + T_{sat}}{2} \right) \quad (23)$$

$$T_3 = \left( \frac{T_{out} + T_{sat}}{2} \right) \quad (24)$$

em que:

$z$  é a cota(m).

$\rho$  é a densidade do fluido ( $\text{kg/m}^3$ ).

$\dot{m}_{in}$  é a taxa de variação de massa na entrada da região subresfriada ( $\text{kg/s}$ ).

$\dot{m}_{12}$  é a taxa de variação de massa na entrada da região bifásica ( $\text{kg/s}$ ).

$\dot{m}_{23}$  é a taxa de variação de massa na entrada da região superaquecida ( $\text{kg/s}$ ).

$\dot{m}_{out}$  é a taxa de variação de massa na saída da região superaquecida ( $\text{kg/s}$ ).

$h_{in}$  é a entalpia específica do fluido na entrada da região subresfriada ( $\text{kJ/kg}$ ).

$h_l$  é a entalpia específica do fluido na entrada da região bifásica( $\text{kJ/kg}$ ).

$h_v$  é a entalpia específica do fluido na entrada da região superaquecida ( $\text{kJ/kg}$ ).

$h_{out}$  é a entalpia específica do fluido na saída da região superaquecida ( $\text{kJ/kg}$ ).

$p$  é a pressão no lado secundário (bar).

$A$  é a área da secção reta do feixe de tubos do gerador de vapor ( $\text{m}^2$ ).

$T_{in}$  é a temperatura da água na entrada da região subresfriada ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_{out}$  é a temperatura na saída do gerador de vapor (saída da região superaquecida) ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_{sat}$  é a temperatura de saturação ( $^{\circ}\text{C}$ ).

#### 4.4 Equações do Modelo do Secundário do Gerador de Vapor (Modificadas)

Rearranjando as equações anteriores de balanço de massa e de energia para as três regiões do SG com relação às variáveis de estado  $p$ ,  $T_{out}$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ , e  $L_3$ , as equações do modelo tornam-se (para detalhes da dedução, ver Apêndice C):

$$B_{11} \frac{dL_1}{dt} + B_{12} L_1 \frac{dp}{dt} + B_{13} L_1 \frac{dT_{in}}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{12} \quad (25)$$

$$B_{21} \frac{dL_1}{dt} + B_{22} L_1 \frac{dp}{dt} + B_{23} L_1 \frac{dT_{in}}{dt} = \dot{m}_{in} h_{in} - \dot{m}_{12} h_l + W_1 \quad (26)$$

$$B_{31} \frac{dL_1}{dt} + B_{32} \frac{dL_2}{dt} + B_{33} L_2 \frac{dp}{dt} = \dot{m}_{12} - \dot{m}_{23} \quad (27)$$

$$B_{41} \frac{dL_1}{dt} + B_{42} \frac{dL_2}{dt} + B_{43} L_2 \frac{dp}{dt} = W_2 + \dot{m}_{12} h_l - \dot{m}_{23} h_v \quad (28)$$

$$B_{51} \frac{dL_1}{dt} + B_{52} \frac{dL_2}{dt} + B_{53} (L - L_1 - L_2) \frac{dp}{dt} + B_{54} (L - L_1 - L_2) \frac{dT_{out}}{dt} = \dot{m}_{23} - \dot{m}_{out} \quad (29)$$

$$B_{61} \frac{dL_1}{dt} + B_{62} \frac{dL_2}{dt} + B_{63} (L - L_1 - L_2) \frac{dp}{dt} + B_{64} (L - L_1 - L_2) \frac{dT_{out}}{dt} = W_3 + \dot{m}_{23} h_v - \dot{m}_{out} h_{out} \quad (30)$$

em que os coeficientes B nas equações acima dependem das variáveis  $p$ ,  $T$  e da área da seção reta  $A$  do feixe de tubos e são expressos por:

$$B_{11} = A[\rho(T_1, p) - \rho_l] \quad (31)$$

$$B_{12} = A \left[ \frac{\partial \rho(T_1, p)}{\partial p} + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho(T_1, p)}{\partial T_1} \frac{dT_{sat}}{dp} \right] \quad (32)$$

$$B_{13} = A \left[ \frac{1}{2} \frac{\partial \rho(T_1, p)}{\partial T_1} \right] \quad (33)$$

$$B_{21} = A[h(T_1, p)\rho(T_1, p) - h_l \rho_l] \quad (34)$$

$$B_{22} = A \left\{ h(T_1, p) \left[ \frac{\partial \rho(T_1, p)}{\partial p} + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho(T_1, p)}{\partial T_1} \frac{dT_{sat}}{dp} \right] + \rho(T_1, p) \left[ \frac{\partial h(T_1, p)}{\partial p} + \frac{1}{2} \frac{\partial h(T_1, p)}{\partial T_1} \frac{dT_{sat}}{dp} \right] - 1 \right\} \quad (35)$$

$$B_{23} = A \left\{ \frac{1}{2} \left[ h(T_1, p) \frac{\partial \rho(T_1, p)}{\partial T_1} + \rho(T_1, p) \frac{\partial h(T_1, p)}{\partial T_1} \right] \right\} \quad (36)$$

$$B_{31} = A(\rho_l - \rho_v) \quad (37)$$

$$B_{32} = A(\rho_l - \rho_v)(1 - \bar{X}) \quad (38)$$

$$B_{33} = A \left( \frac{\partial \rho_v}{\partial p} \bar{\chi} + (1 - \bar{\chi}) \frac{\partial \rho_l}{\partial p} \right) \quad (39)$$

$$B_{41} = A(\rho_l h_l - \rho_v h_v) \quad (40)$$

$$B_{42} = A\{(1 - \bar{\chi})(h_v \rho_l - h_v \rho_v)\} \quad (41)$$

$$B_{43} = A \left\{ \left( h_v \frac{\partial \rho_v}{\partial p} + \rho_v \frac{\partial h_v}{\partial p} \right) \bar{\chi} + \left( h_v \frac{\partial \rho_l}{\partial p} + \rho_l \frac{\partial h_v}{\partial p} \right) (1 - \bar{\chi}) - 1 \right\} \quad (42)$$

$$B_{51} = A[\rho_v - \rho(T_3, p)] \quad (43)$$

$$B_{52} = A[\rho_v - \rho(T_3, p)] \quad (44)$$

$$B_{53} = A \left[ \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial p} + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial T_3} \frac{dT_{sat}}{dp} \right] \quad (45)$$

$$B_{54} = A \left[ \frac{1}{2} \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial T_3} \right] \quad (46)$$

$$B_{61} = A[\rho_v h_v - \rho(T_3, p)h(T_3, p)] \quad (47)$$

$$B_{62} = A[\rho_v h_v - \rho(T_3, p)h(T_3, p)] \quad (48)$$

$$B_{63} = A \left\{ h(T_3, p) \left[ \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial p} + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial T_3} \frac{dT_{sat}}{dp} \right] + \rho(T_3, p) \left[ \frac{\partial h(T_3, p)}{\partial p} + \frac{1}{2} \frac{\partial h(T_3, p)}{\partial T_3} \frac{dT_{sat}}{dp} \right] - 1 \right\} \quad (49)$$

$$B_{64} = A \left\{ \frac{1}{2} \left[ h(T_3, p) \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial T_3} + \rho(T_3, p) \frac{\partial h(T_3, p)}{\partial T_3} \right] \right\} \quad (50)$$

A grandeza  $\bar{\chi}$  que comparece nas Equações 38, 39, 41 e 42 é a fração média de vazios para a região bifásica dada pela equação (para detalhes da dedução, ver Apêndice D):

$$\bar{x} = (1 + \delta) \cdot \left\{ 1 - \delta \cdot \ln \left( 1 + \frac{1}{\delta} \right) \right\} \quad (51)$$

sendo  $\delta$  definido por:

$$\delta = \frac{\rho_v}{\rho_l - \rho_v} \quad (52)$$

e  $\rho_v$  e  $\rho_l$  são, respectivamente, a densidade do vapor saturado e a densidade do líquido saturado.

#### 4.5 Modelo em Simulink

Os componentes do circuito primário e secundário do IRIS são implementados utilizando os blocos do SIMULINK como *Integrator*, *Gain*, *Sum*, etc. O *Riser* e o *Downcomer* do IRIS são realizados utilizando o bloco *Transport Delay* e alguns outros blocos usados corriqueiramente. Dado que a dinâmica do SG é complexa, ele é realizado com o emprego dos blocos de função *MATLAB Fcn* do SIMULINK, permitindo que uma parte da programação seja feita em ambiente MATLAB e trazendo esses resultados de volta para o ambiente SIMULINK. O esquema do modelo dinâmico MODIRIS em SIMULINK/MATLAB que foi desenvolvido no presente trabalho é mostrado no Apêndice E. Os detalhes do modelo dinâmico estão incluídos nos subsistemas.

#### 4.6 Validação do modelo em SIMULINK

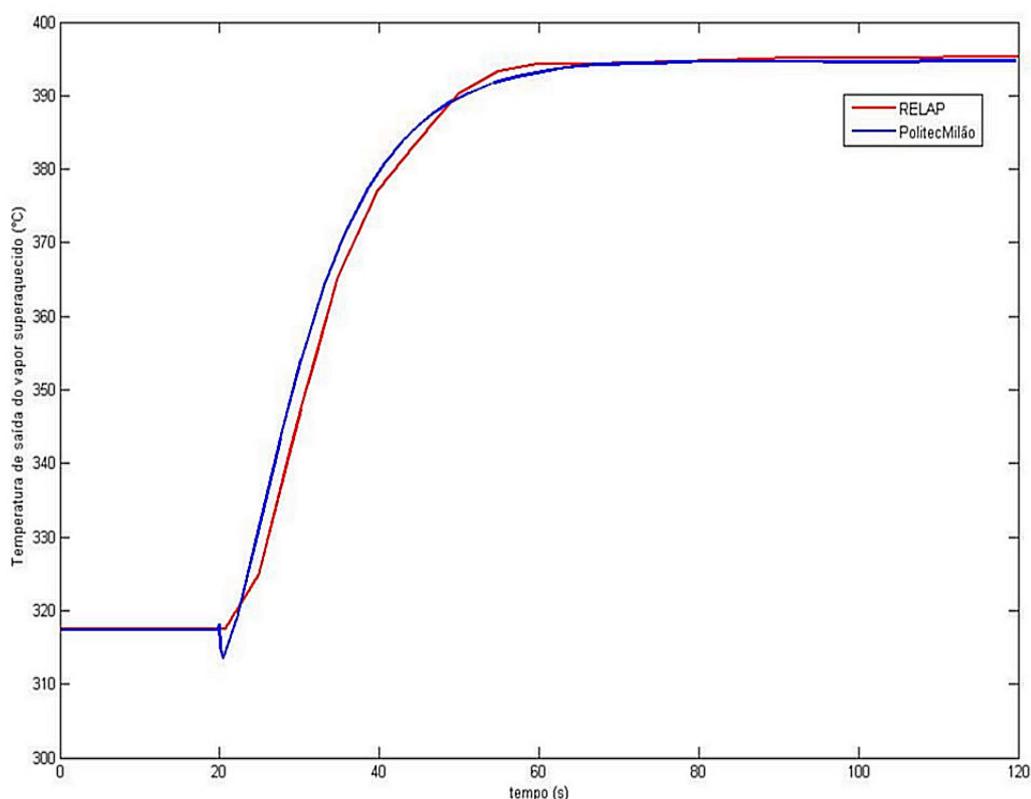
Por meio do uso do código MODIRIS desenvolvido em SIMULINK no presente trabalho, podem ser feitas simulações numéricas, cujos resultados servem de base para comparação com resultados experimentais quando o protótipo do reator IRIS for construído.

Como não há dados experimentais, a validação do código MODIRIS foi comprovada por meio da comparação entre os resultados numéricos de um transitório da temperatura de saída do vapor superaquecido no circuito secundário do SG, obtidos com o código RELAP, e os resultados obtidos por meio de uma simulação numérica feita com o uso do código MODIRIS, utilizando as mesmas condições iniciais e o mesmo transitório do RELAP.

O transitório do RELAP empregado na validação do MODIRIS não foi feito

aqui, e sim pelos pesquisadores do Instituto Politécnico de Milão\*, que também desenvolveram um código para o IRIS em SIMULINK.

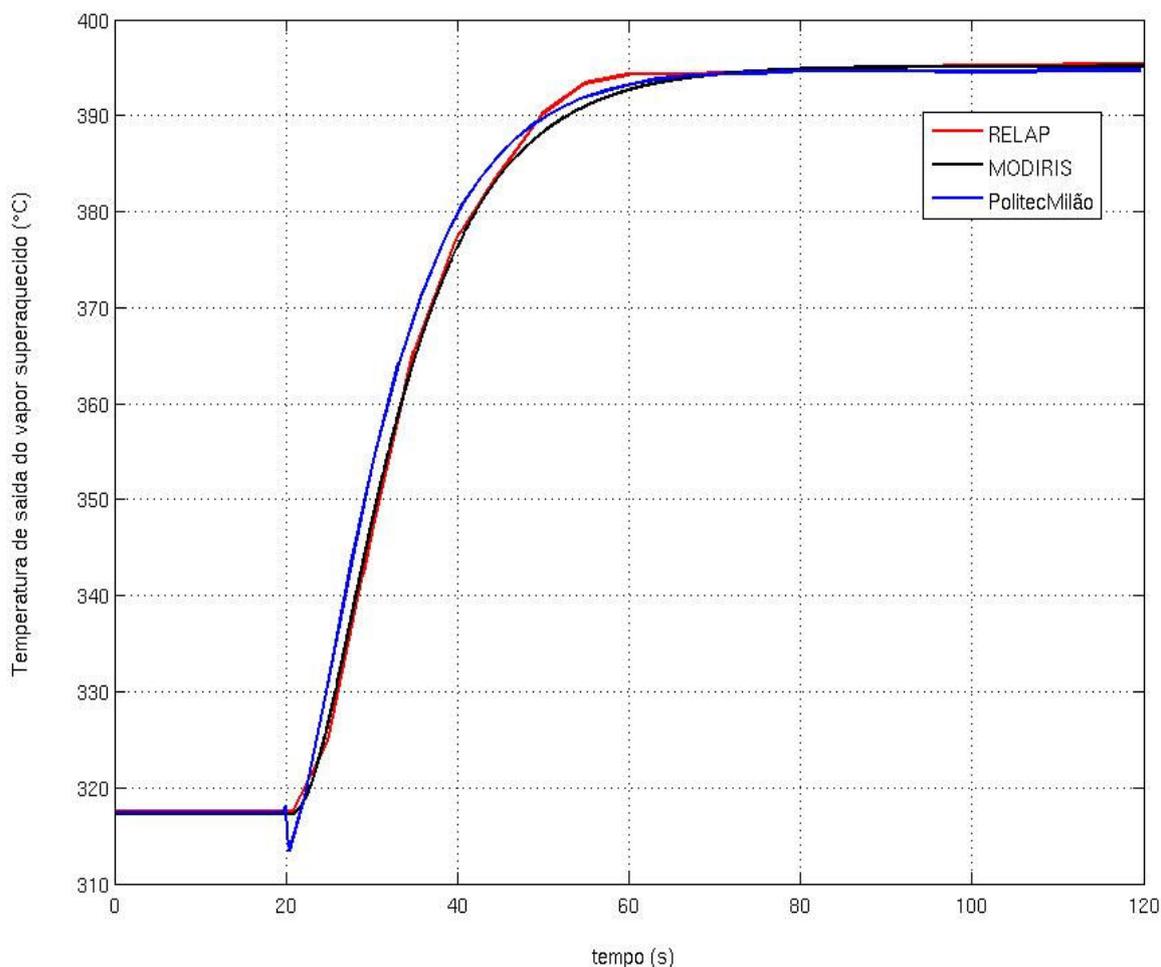
Eles realizaram uma simulação numérica com o código RELAP, para um transitório de diminuição (*step*) de 10% no fluxo de massa de água na entrada da região sub-resfriada dos geradores de vapor, tendo início no instante de 20 s e terminando no instante 120 s e um gráfico da temperatura de saída do vapor superaquecido versus tempo foi obtido. Em seguida, eles realizaram o mesmo transitório com o código desenvolvido por eles em SIMULINK e cujo resultado pode ser visto na Figura 8 a seguir.



*Figura 8 – Benchmark pelo Instituto Politécnico de Milão*

De posse desse resultado, foi feita uma simulação numérica, mas desta vez com o código MODIRIS para o mesmo transitório do RELAP e, dessa forma, o gráfico da temperatura de saída do vapor superaquecido versus tempo foi obtido. Em seguida, o resultado dessa simulação foi sobreposto ao gráfico acima, tendo como resultado o gráfico a seguir (Figura 9).

\* Lima, F. R. A, comunicação pessoal, CRCN/CNEN, 2009.



*Figura 9 – Superposição das simulações realizadas com os três códigos*

Analisando os gráficos acima, observa-se que a diferença máxima entre as temperaturas de saída do vapor superaquecido entre os resultados do RELAP e o MODIRIS próximo ao final do transitório (aproximadamente 58 s) é da ordem de 2 °C, desvio considerado insignificante do ponto de vista de aplicação real. Deve-se destacar também a capacidade do código MODIRIS em detectar o início e o fim do transitório com uma precisão bastante satisfatória. Além do mais, durante os 120 s de simulação os valores das temperaturas encontram-se praticamente idênticos, e assim, torna-se aceitável a validade do referido código. Desta forma, ficarão merecedoras de crédito as análises que serão realizadas.

Quando comparado o gráfico obtido com o RELAP e o gráfico obtido com o código desenvolvido pelos pesquisadores do Instituto Politécnico de Milão, nota-se a acentuada discrepância que existe no início do transitório e em uma larga faixa do mesmo, o que não ocorreu com o MODIRIS. Assim, mais uma vez, este resultado

corroborou para a confiabilidade e consolidação do código MODIRIS aqui desenvolvido.

Uma vez que está validado, o código MODIRIS servirá de referência para o presente estudo de análise de transitórios de concentração de ácido bórico no circuito primário do IRIS, onde as influências das variações impostas às variáveis de interesse serão computadas por meio do referido modelo. A condição inicial do MODIRIS é o estado estacionário a plena potência, onde são conhecidos os valores das variáveis dinâmicas e o estado termodinâmico do lado secundário.

A introdução dos casos de boração (injeção de água borada no circuito primário) e deboração (diluição da água borada do primário) no modelo acima dependem do conhecimento do modelo físico representativo das trocas de massa d'água do primário e de água borada do tanque de boro. Esse modelo físico foi proposto por SILVA (2008). O Apêndice F apresenta os detalhes de uma dedução para o referido modelo.

Ele estabelece uma equação de conservação de massa, assumindo que a variação da concentração de ácido bórico no circuito primário obedece a um modelo homogêneo, conforme mostrado na Equação 53.

$$\frac{d\kappa}{dt} = \gamma(\kappa_E - \kappa) \quad (53)$$

em que:

$$\gamma = \frac{w}{M} \quad (54)$$

Nas Equações 53 e 54,  $\kappa$ ,  $M$  e  $w$  simbolizam a concentração instantânea de ácido bórico no primário, a massa de água deste e a vazão mássica entrando no primário e dele saindo, respectivamente, enquanto  $\kappa_E$  representa uma concentração (de valor constante) proveniente de um reservatório externo (tanque de boro), que é responsável pela variação na concentração do ácido bórico do primário.

Uma vez que é conhecida a variação da concentração de boro no circuito primário, durante uma etapa de deboração ou boração, expressa-se a reatividade em função da concentração de ácido bórico para um reator térmico, obtendo-se, em seguida, o coeficiente de reatividade do ácido bórico, em pcm/ppm, e como função do fator de utilização térmica na ausência de ácido bórico,  $f_0$ , conforme expressa a

Equação 55. Os detalhes da dedução da equação abaixo podem ser encontrados no Apêndice G.

$$\alpha_B = -192 \cdot (1 - f_0) \quad (55)$$

Dessa maneira, substituindo-se a Equação 55 na Equação 5 e empregando a Equação 53, segue-se a implementação imediata dos casos de boração e deboração no código MODIRIS.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Implementando no código MODIRIS a equação que rege a dinâmica da variação de concentração de ácido bórico no circuito primário (Equação 53) juntamente com a equação da reatividade devida ao boro (Equação 5), e a fim de simular os casos de boração e deboração de interesse, deve-se calcular o parâmetro  $\gamma$  que comparece na Equação 53.

Para tanto, empregam-se alguns dos parâmetros do projeto do reator IRIS (CARELLI, 2003), listados na Tabela 2 a seguir. Os demais parâmetros termoidrúlicos e neutrônicos empregados na inicialização do código MODIRIS podem ser consultados no Anexo B.

Tabela 2 – Alguns parâmetros do projeto IRIS

Parâmetros	Valor
Densidade da água do primário, $\rho_p [kg/m^3]$	656
Volume de água do primário, $V_p [m^3]$	400
Densidade da água nos tanques de boração ou deboração, $\rho_T [kg/m^3]$	1000
Vazão dos tanques de boração ou deboração, $\phi_T [m^3/s]$	0,0063

Como  $w = \rho_T \cdot \phi_T$  e  $M = \rho_p \cdot V_p$ , encontra-se

$$\gamma = \frac{w}{M} = \frac{\rho_T \cdot \phi_T}{\rho_p \cdot V_p}$$

resultando, por fim:

$$\gamma = 2,4 \times 10^{-5} s^{-1} \quad (56)$$

Os reatores refrigerados a água pressurizada possuem uma solução de ácido bórico diluído do refrigerante a uma determinada concentração.

Durante a operação de *criticalização* do reator, essa concentração de boro é variada até um valor que torne o reator crítico. O valor dessa concentração é chamada *concentração crítica*.

Para a usina Angra 1, a concentração crítica de boro é de 987 ppm na condição de quente a plena potência (QPP), todas as barras retiradas (TBR) e xenônio em equilíbrio (BEZERRA et al., 1986).

Tendo em vista que o reator IRIS ainda não foi construído, admitiu-se para a concentração crítica de boro diluído no refrigerante do reator IRIS, para efeito da análise dos transitórios de boro, o mesmo valor da concentração crítica de boro de Angra 1, ou seja o valor  $\kappa_0 = 987 \text{ ppm}$ .

Para o transitório de boração, em conformidade com a operação das usinas do tipo PWR, foi adotado o mesmo valor de concentração  $\kappa_E$  para o reservatório externo de Angra 1 (SANTOS, 1999). Já para o transitório operacional de deboração, a concentração do tanque externo ( $\kappa_E$ ), está de acordo com as especificações técnicas (FURNAS, 1976a).

A Tabela 3 a seguir resume os dados de concentração inicial do primário e do tanque externo admitidas para as respectivas manobras de boração e deboração no reator IRIS.

Tabela 3 – Operações de boração e deboração e respectivas concentrações

Operação	$\kappa_0$ (ppm)	$\kappa_E$ (ppm)
DEBORAÇÃO	987	0
BORAÇÃO	987	2000

Ressalte-se que os valores de referência das Tabelas 2 e 3 acima serão empregados na simulação de *transitórios operacionais* de boração e deboração.

Assim, tanto para a boração quanto para a deboração, as simulações têm início no instante  $t = 0 \text{ s}$  e o reator encontra-se no estado estacionário e a plena potência. Em seguida um transitório contínuo de concentração de boro no primário é iniciado no instante  $t = 500 \text{ s}$ , tanto na simulação da boração quanto na simulação da deboração<sup>13</sup>.

Tanto para a boração quanto para deboração as simulações foram finalizadas no instante  $t = 5500 \text{ s}$ .

As especificações técnicas das usinas PWR garantem uma variação de carga de 5% por minuto ou de 10%, quando estiver operando na faixa de 15% a 100% da

<sup>13</sup> A escolha do instante  $t = 500 \text{ s}$  para o início dos transitórios de boração e deboração foi inteiramente arbitrária.

carga nominal. Essa estratégia de operação, que é recomendada pelo fabricante, visa a proteger o combustível. A proteção do combustível é uma das preocupações fundamentais dos projetistas e dos órgãos licenciadores de usina em todo o mundo (FURNAS, 1976b).

Assim, a concentração final de boro estipulada para o término de cada transitório no presente trabalho foi o suficiente para satisfazer as especificações técnicas das usinas PWR.

Com o intuito de facilitar e elucidar as discussões dos resultados que se seguem, será de suma importância obter a solução analítica da Equação 53:

$$\frac{d\kappa}{dt} = \gamma(\kappa_E - \kappa)$$

Resolvendo a equação diferencial acima, tem-se que:

$$\kappa(t) = \kappa_E + (\kappa_0 - \kappa_E)e^{-\gamma t} \quad (57)$$

Com isso, conclui-se que a variação de concentração de boro no circuito primário é exponencial.

A constante de tempo neste caso pode ser definida por:

$$\theta = \frac{1}{\gamma} \quad (58)$$

Assim, a Equação 57 poderá ser re-escrita assim:

$$\kappa(t) = \kappa_E + (\kappa_0 - \kappa_E)e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (59)$$

De acordo com a Equação 56, a constante de tempo será dada por:

$$\theta \approx 41666,67 \text{ s} \quad (60)$$

Em concordância com as especificações técnicas para as variações operacionais de potência em reatores PWR, uma variação de concentração de 100 ppm de boro no primário foi estipulada para ambos os transitórios. Com isso, as concentrações de boro no refrigerante, ao finalizar os transitórios simulados para boração e deboração, são, respectivamente, 1087 ppm e 887 ppm. O código, então, dispara um fechamento automático para a válvula que libera o sistema de injeção de ácido bórico quando estes valores finais de concentração são alcançados. Desse momento em diante, o reator passa a operar em um novo estado estacionário com uma potência diferente da inicial.

Para uma boração ou uma deboração iniciando no instante de tempo  $t = 500$  s, a concentração final será atingida no instante:

$$t = 500 + \theta \cdot \ln \left( \frac{\kappa_0 - \kappa_E}{\kappa - \kappa_E} \right) \quad (61)$$

Substituindo os dados da Tabela 3 na Equação 61 e o valor da constante de tempo, as concentrações finais estipuladas serão atingidas nos instantes:

$$t_{\text{boração}} = 4830,65 \text{ s} \quad (62)$$

$$t_{\text{deboração}} = 4951,04 \text{ s} \quad (63)$$

Estes instantes justificam o tempo total de simulação adotado nos casos de boração e deboração.

A seguir, os resultados das simulações desses casos serão apresentados e discutidos em seus pormenores.

## Deboração

### 1. Concentração de ácido bórico no circuito primário versus tempo

A redução da concentração de ácido bórico no circuito primário tem um decaimento exponencial muito suave para o intervalo de tempo de diluição ( $\Delta t = 4451,04 s$ ). A Figura 10 ilustra esse fato evidenciado pela observação de que a partir do instante  $t = 500 s$  ao instante  $t = 4951,04 s$  a curva apresenta um comportamento praticamente linear. Esse comportamento se deve ao fato de a vazão do tanque de boro ser muito pequena (Tabela 2), o que conduziu, por sua vez, a uma constante de tempo grande ( $\theta \approx 41666,67 s$ ) em comparação com o intervalo de tempo de diluição ( $\Delta t = 4451,04 s$ ).

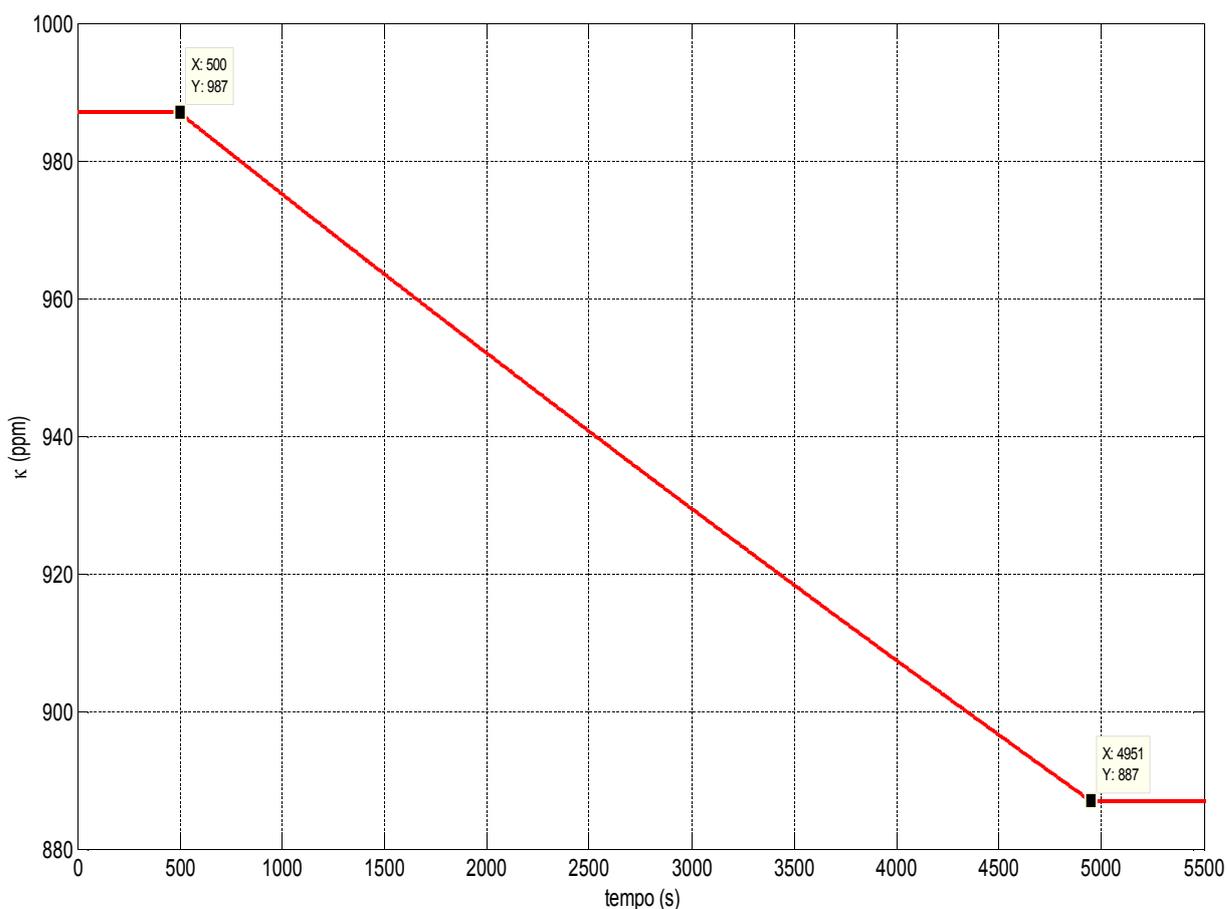


Figura 10 – Concentração de ácido bórico no primário do IRIS para uma deboração

## 2. Reatividade devido ao boro versus tempo

Sendo o boro um excelente absorvedor de nêutrons térmicos, uma deboração resulta em aumento da população de nêutrons térmicos, acarretando em um aumento do fator de multiplicação efetivo. Isto se traduz em uma inserção positiva de reatividade conforme se evidencia na Figura 11. Verifica-se, outrossim, que a inserção positiva de reatividade neste caso é um processo contínuo, crescente e fortemente dependente da variação temporal da concentração do ácido bórico, perdurando o seu efeito sobre a reatividade do sistema enquanto houver o transitório de deboração postulado.

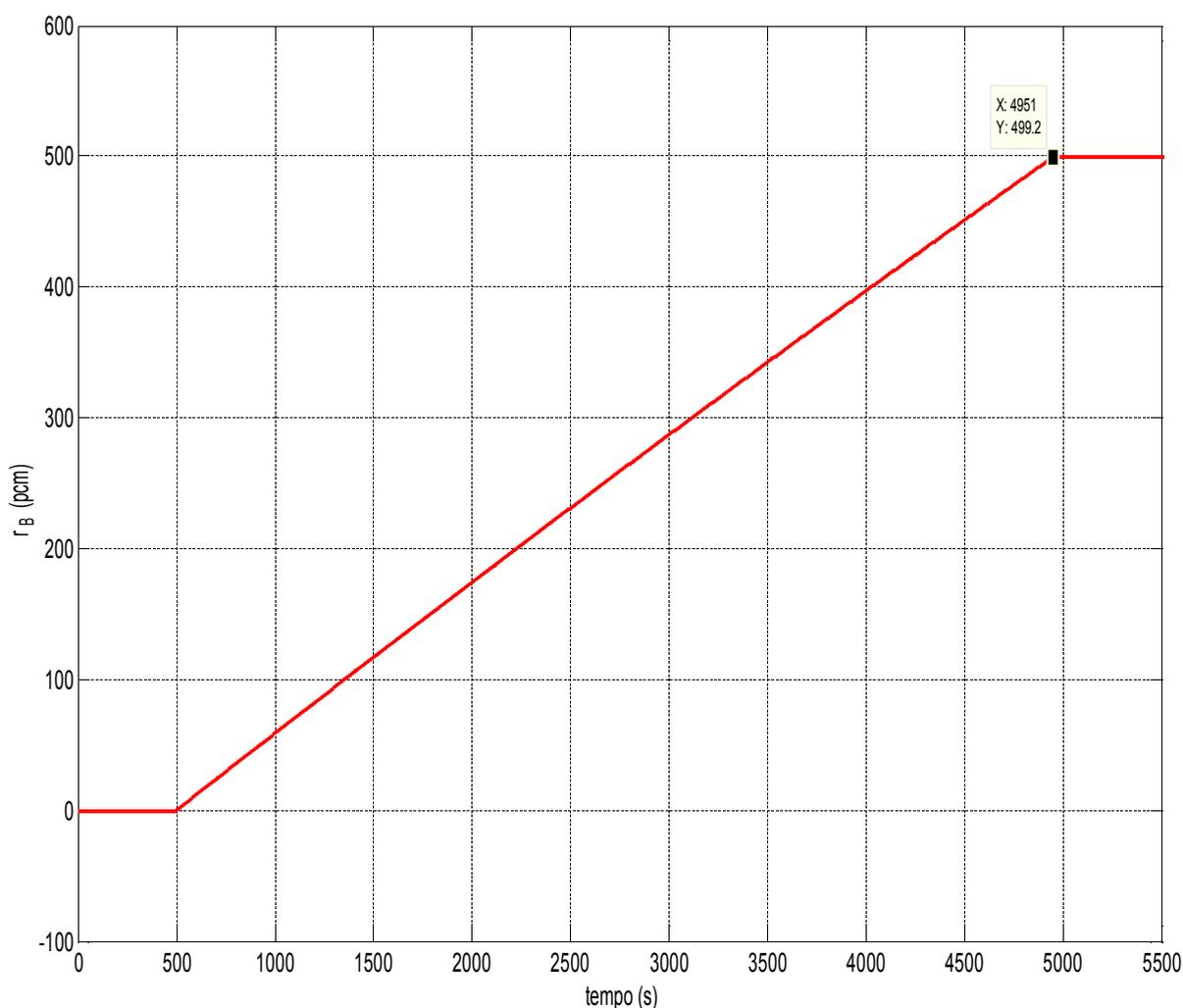


Figura 11 – Reatividade devido ao ácido bórico em uma deboração para o IRIS

### 3. Potência térmica gerada versus tempo

A inserção positiva de reatividade provocada pela diluição de boro eleva as taxas de fissão, acarretando em um aumento da potência térmica gerada no núcleo com o passar do tempo (Figura 12).

Nesta figura percebe-se que a potência térmica atinge um novo estado estacionário após o fim da diluição. Isto só acontece devido aos *feedbacks* neutrônicos do combustível e do moderador que atuam no sentido de conduzir o reator ao estado crítico. Os pormenores sobre as respostas neutrônicas serão aprofundados mais adiante. Nota-se também que a potência térmica final ( $1,081 \times 10^6$  kW) encontra-se dentro do intervalo de variação permitida que é de 10% da potência total (FURNAS, 1976b).

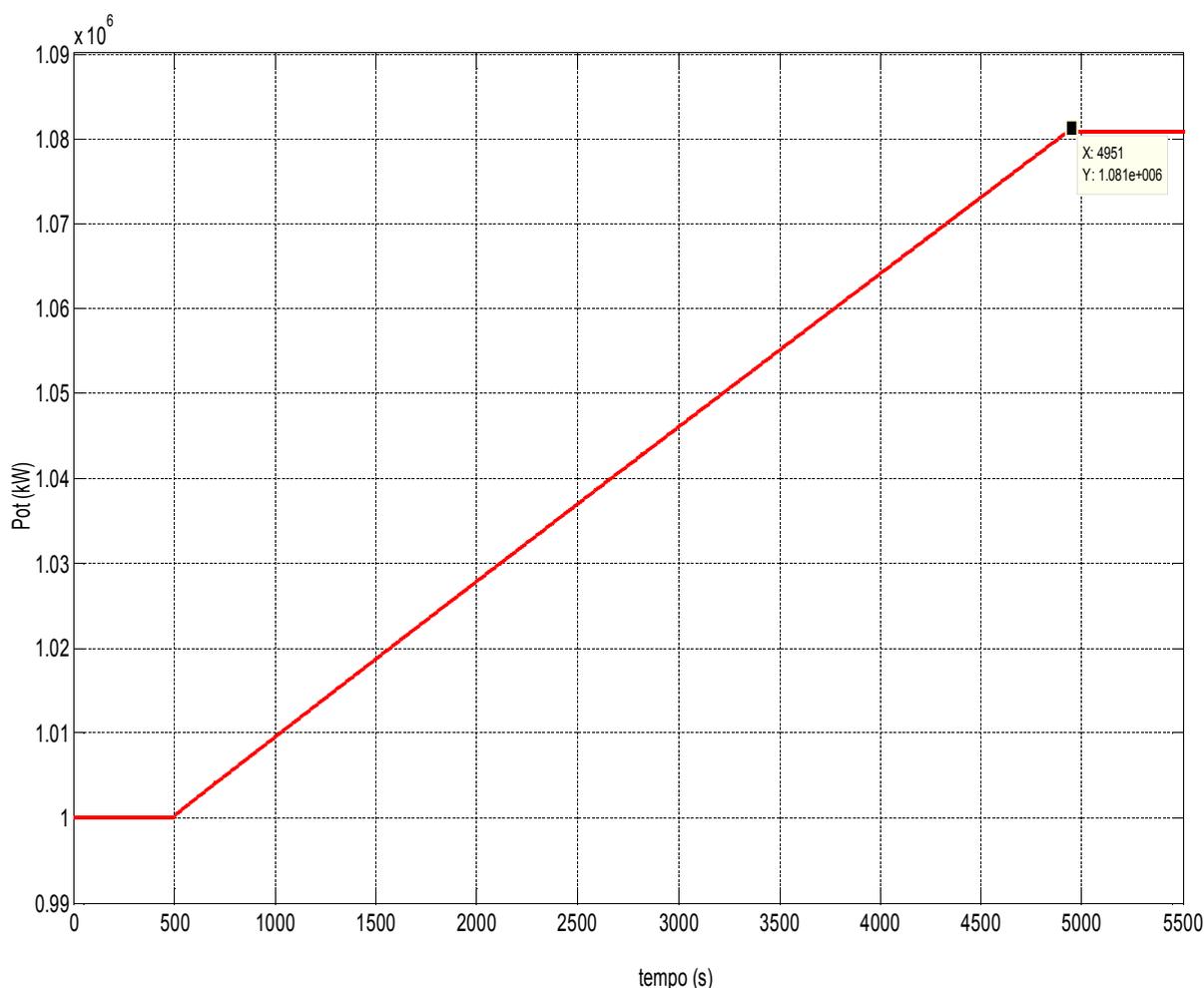
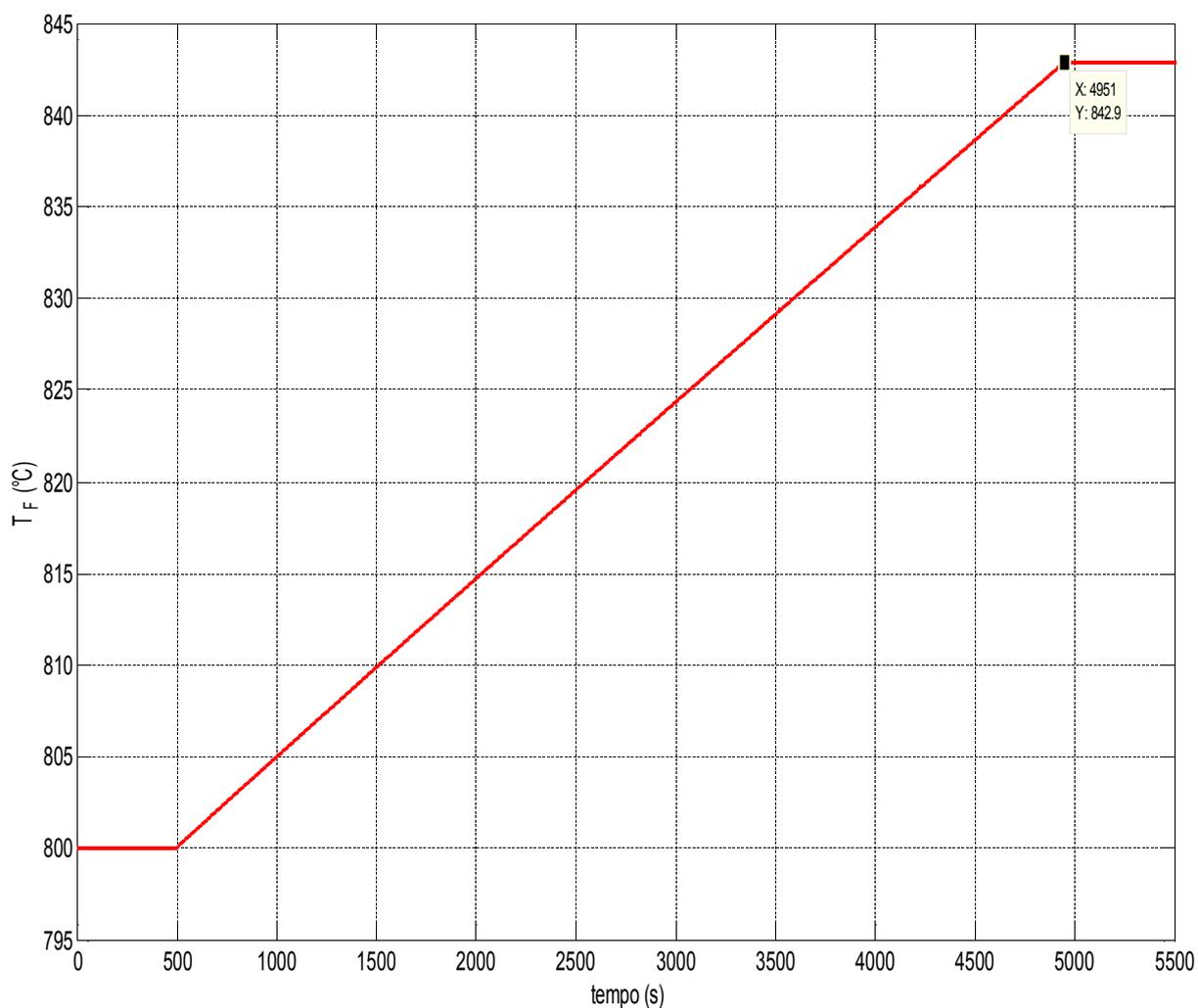


Figura 12 – Potência térmica gerada em uma deborção para o IRIS

#### 4. Temperatura média do combustível versus tempo

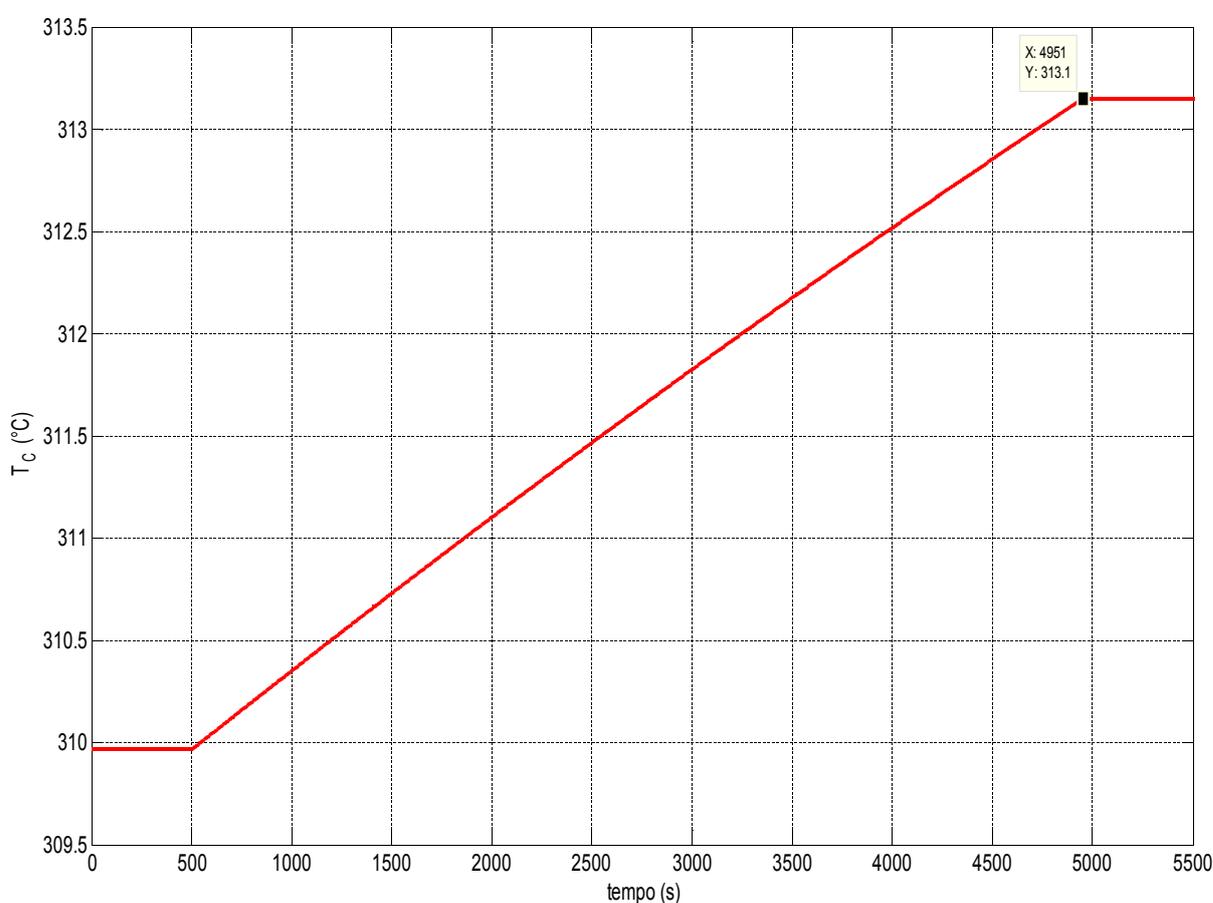
O incremento de potência térmica gerada no combustível, devido ao aumento do fluxo de nêutrons, acarreta em um aumento da temperatura média do combustível conforme mostra a Figura 13. Note que após o término da deboração a temperatura atinge um novo patamar de 842,9 °C. Isto se deve ao fato de a potência térmica gerada ter atingido um novo estado estacionário.



*Figura 13 – Temperatura média do combustível no reator IRIS (deboração)*

## 5. Temperatura média do refrigerante versus tempo

O reator IRIS utiliza água leve como moderador de nêutrons e como refrigerante. Com isso, a água movendo-se em uma trajetória fechada atravessa o núcleo ascendente com um fluxo determinado pelas oito bombas, recebendo calor do combustível. Como a temperatura média do combustível aumenta, seu efeito sobre a temperatura média do refrigerante que atravessa o núcleo pode ser observada na Figura 14 a seguir.



*Figura 14 – Temperatura média do refrigerante que atravessa o núcleo do reator IRIS (deboração)*

A simulação evidencia que a temperatura média do refrigerante atinge um novo patamar no final da diluição, como consequência da estabilização da temperatura média do combustível, pois o gradiente de temperatura entre o combustível e o moderador torna-se constante do instante  $t = 4951,04 \text{ s}$  em diante.

## 6. Reatividade devido ao combustível versus tempo

A variação da reatividade do combustível é geralmente expressa em termos de um coeficiente de reatividade conforme expressa a Equação 3.

O combustível nuclear responde de forma imediata a mudanças no nível de potência, e desta forma altera as condições do sistema. Deve-se garantir que o Coeficiente de Temperatura do Combustível ( $\alpha_f$ ) seja negativo. Isso é caracterizado pelo efeito Doppler do combustível, que aumenta a absorção ressonante do sistema devido ao aumento na temperatura do núcleo.

A Figura 15 ilustra o efeito do aumento da temperatura do combustível sobre a reatividade devido ao efeito Doppler do combustível.

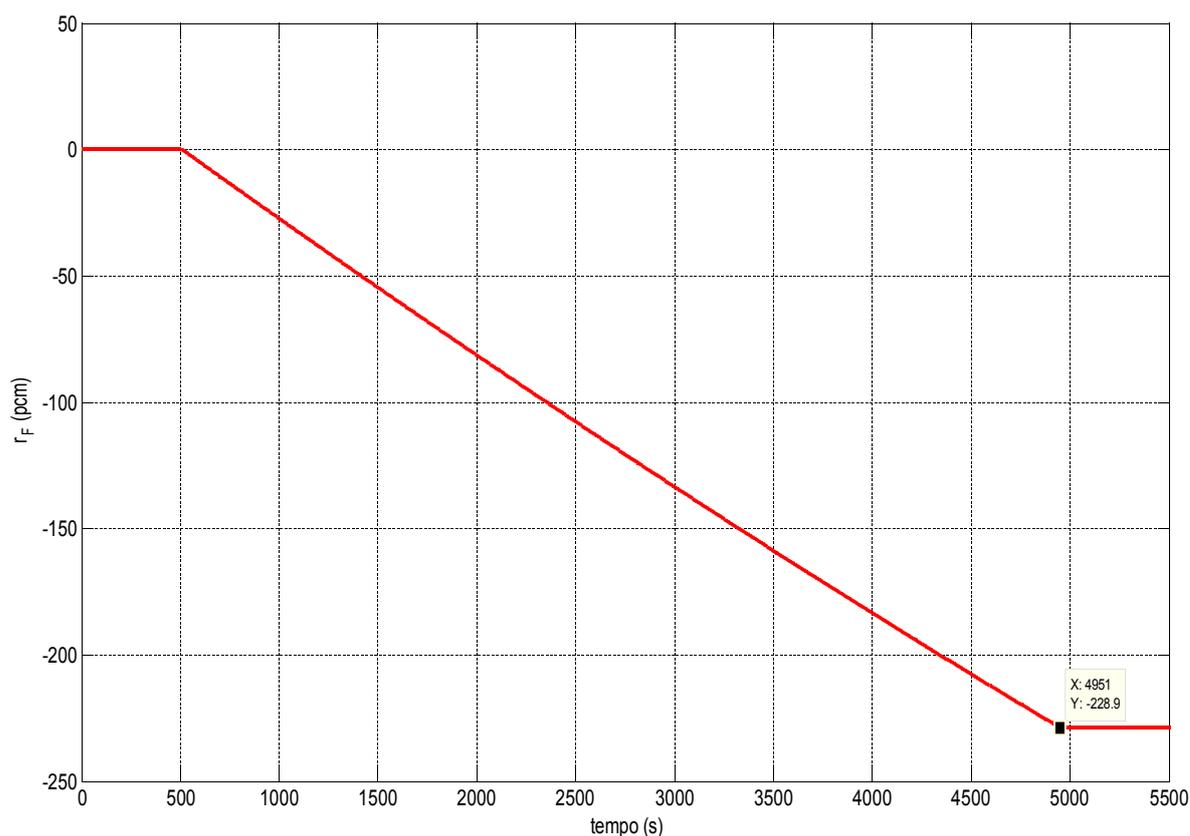


Figura 15 – Reatividade devido ao combustível em uma deboração no reator IRIS

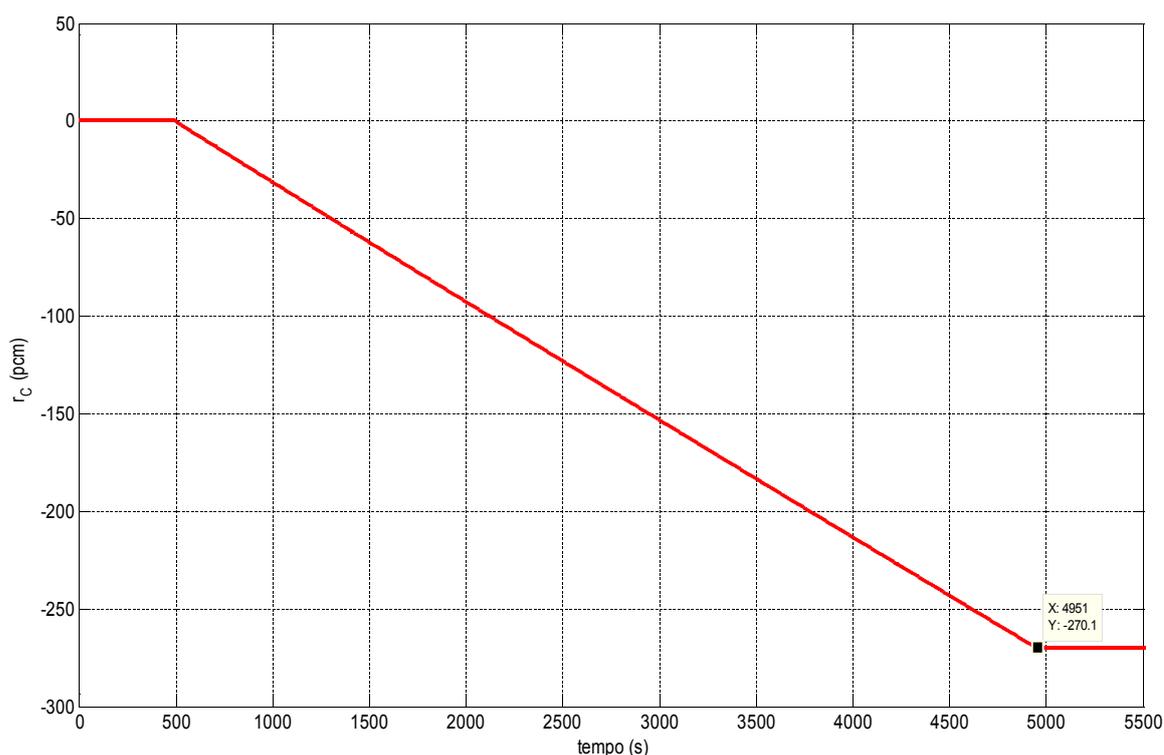
Constata-se também que o aumento da temperatura do combustível insere automaticamente uma reatividade negativa no sistema, demonstrando um dos efeitos do controle da inserção positiva de reatividade devido à deboração.

## 7. Reatividade devido ao moderador versus tempo

A variação da reatividade do moderador é geralmente expressa em termos de um coeficiente de reatividade conforme expressa a Equação 4.

O Coeficiente de Temperatura do Moderador ( $\alpha_c$ ) determina o comportamento do reator devido às mudanças que ocorrem na temperatura do moderador. Esse coeficiente também deve ser negativo.

Em um reator térmico moderado a água o efeito dominante sobre a reatividade aparece devido a mudança na densidade do moderador, causada pela expansão térmica e formação de vapor d'água. A Figura 16 ilustra o efeito do aumento da temperatura do moderador sobre a reatividade devido apenas ao moderador.



*Figura 16 – Reatividade devido ao moderador em uma deborção no reator IRIS*

Constata-se também que o aumento da temperatura do moderador, assim como ocorreu com o combustível, insere automaticamente uma reatividade negativa no sistema, demonstrando um outro efeito do controle da inserção positiva de reatividade devido à deborção.

## 8. Reatividade Total versus tempo

A reatividade total do sistema (Equação 7) é composta, no presente modelo, pelos *feedbacks* neutrônicos na reatividade, definidos como uma função linear da temperatura do combustível e da temperatura do moderador, pelas barras de controle e pelo ácido bórico diluído no refrigerante.

As barras, entretanto, são mantidas fixas na altura de referência ( $\xi = \xi_0$ ) tendo, com isso, contribuição nula para a reatividade total, restando apenas a análise sobre a reatividade total devido ao moderador, ao combustível e ao ácido bórico.

A reatividade total do sistema era igual a zero (reator crítico) até o início do transitório que tem início no instante  $t = 500\text{ s}$ .

Sendo o transitório causado por uma deborção, haverá um incremento na reatividade devido ao boro (Figura 11) inserindo reatividade positiva no sistema.

Com isso, o sistema responde rapidamente no início do transitório provocando um aumento na reatividade total que encontrava-se nula até o instante  $t = 500\text{ s}$  conforme se nota na Figura 17. Isso, por sua vez, implica em um aumento do fluxo de nêutrons térmicos, o que se traduz em um aumento da potência térmica gerada. Desse modo, o combustível e o moderador sofrem um aumento de temperatura conforme ilustram as Figuras 13 e 14. Em seguida, os *feedbacks* neutrônicos entram em ação para limitar o incremento positivo da reatividade total devido ao boro, inserindo reatividade negativa no sistema (Figuras 15 e 16). Essa limitação imposta pelos *feedbacks* pode ser percebida na Figura 17 entre os instantes  $t = 500\text{ s}$  e  $t = 4951\text{ s}$ . E de modo mais contundente pelo ponto de máximo encontrado entre os instantes  $t = 500\text{ s}$  e  $t = 510,5\text{ s}$  da mesma figura.

A partir do final da deborção ( $t = 4951,04\text{ s}$ ) a concentração de boro no primário atinge e permanece no valor estipulado, cessando a inserção positiva de reatividade devido ao boro. Entretanto, os *feedbacks* neutrônicos continuam inserindo reatividade negativa no sistema e, com isso, a reatividade total sofrerá uma variação no sentido de se tornar nula novamente, como se pode verificar na Figura 17 entre os instantes  $t = 4951,04\text{ s}$  e  $t = 4952\text{ s}$ . Contudo, a reatividade total torna-se em seguida negativa, volta a aumentar e finalmente se estabiliza no valor nulo e o reator volta ao estado crítico.

Isso se deve ao fato de embora a reatividade total ser nula num determinado

instante, ainda há um saldo de reatividade negativa inserida pelo combustível e pelo moderador, pois até pouco antes do instante  $t = 4952\text{ s}$  as temperaturas do combustível e do moderador ainda apresentam um breve aumento, até que a reatividade total atinge um valor mínimo ( $t = 4952\text{ s}$ ). A suave inserção negativa de reatividade percebida na Figura 17 após o final do transitório provoca uma pequena queda de potência, ocasionando uma leve queda da temperatura do combustível e, desse modo, aumentando a reatividade total do sistema, até que a potência finalmente se estabiliza, as temperaturas do combustível e do moderador se tornam estacionárias e a reatividade total se torna nula, conforme mostra a Figura 17 após o instante  $t = 5041\text{ s}$ .

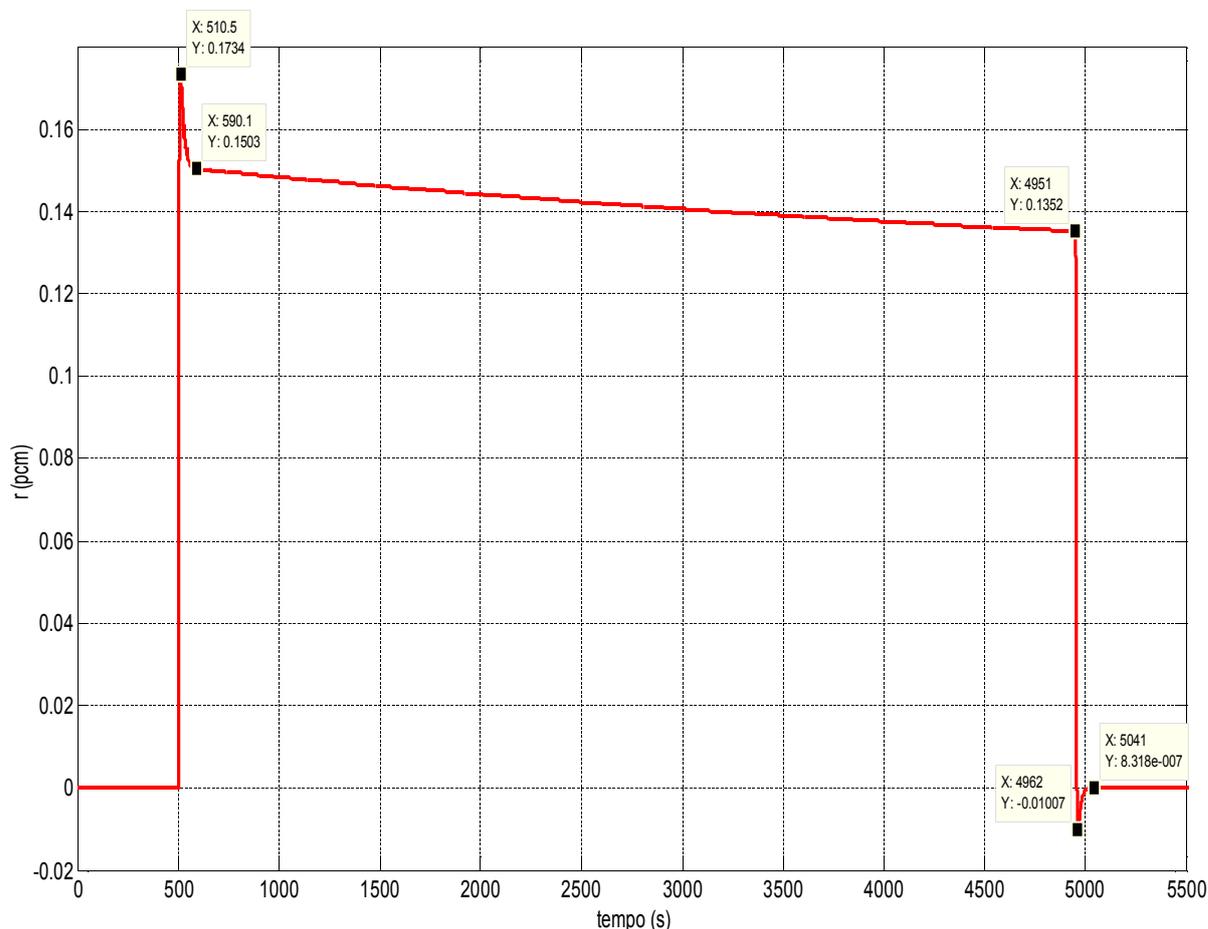
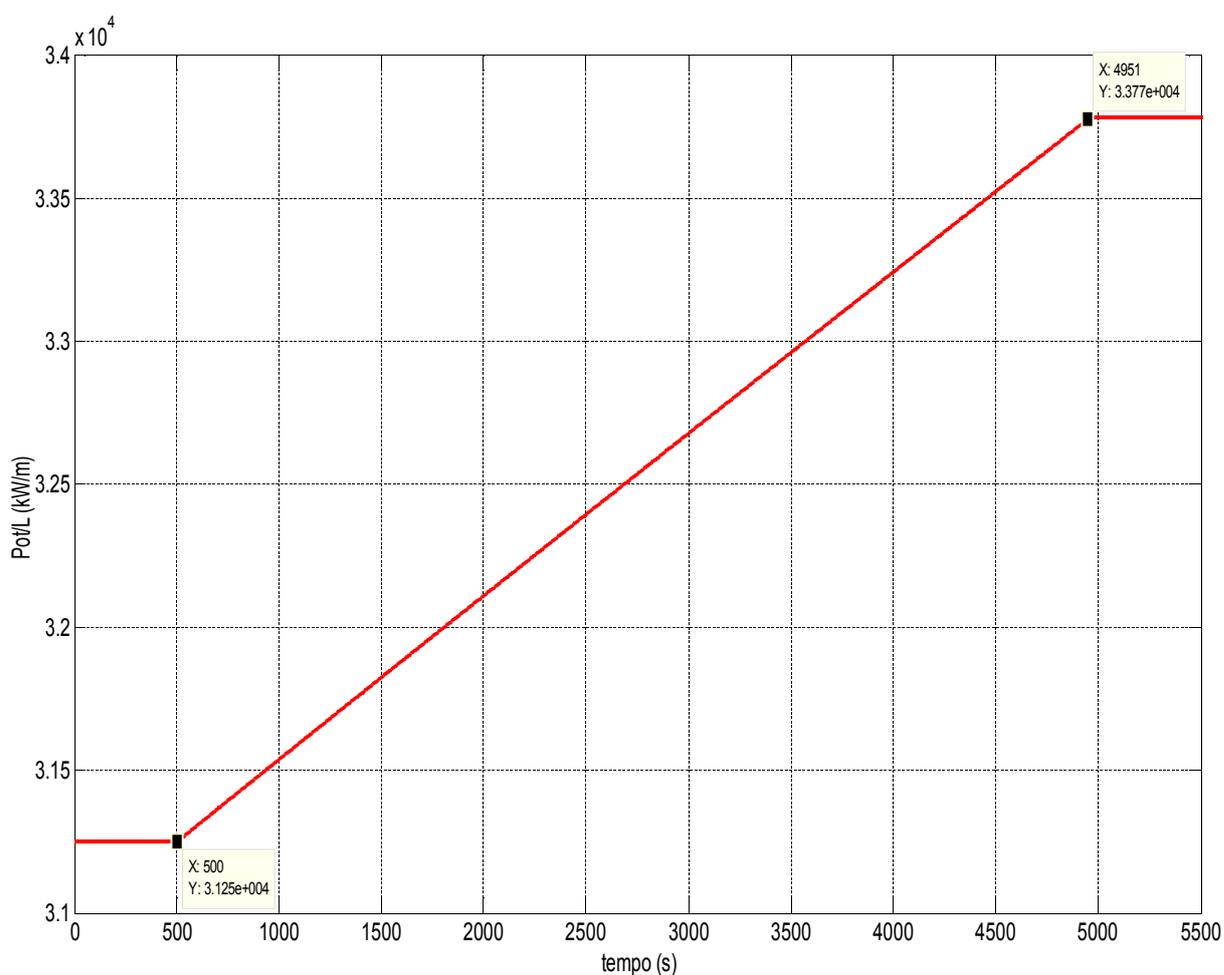


Figura 17 – Reatividade total em uma deborção para o IRIS

## 9. Potência térmica por unidade de comprimento versus tempo

Após sair do núcleo em direção ao plenum superior do vaso, o fluido segue um curto trajeto radial, em direção a oito bombas primárias, sendo bombeado no sentido descendente, resfriando-se ao transferir calor para os geradores de vapor.

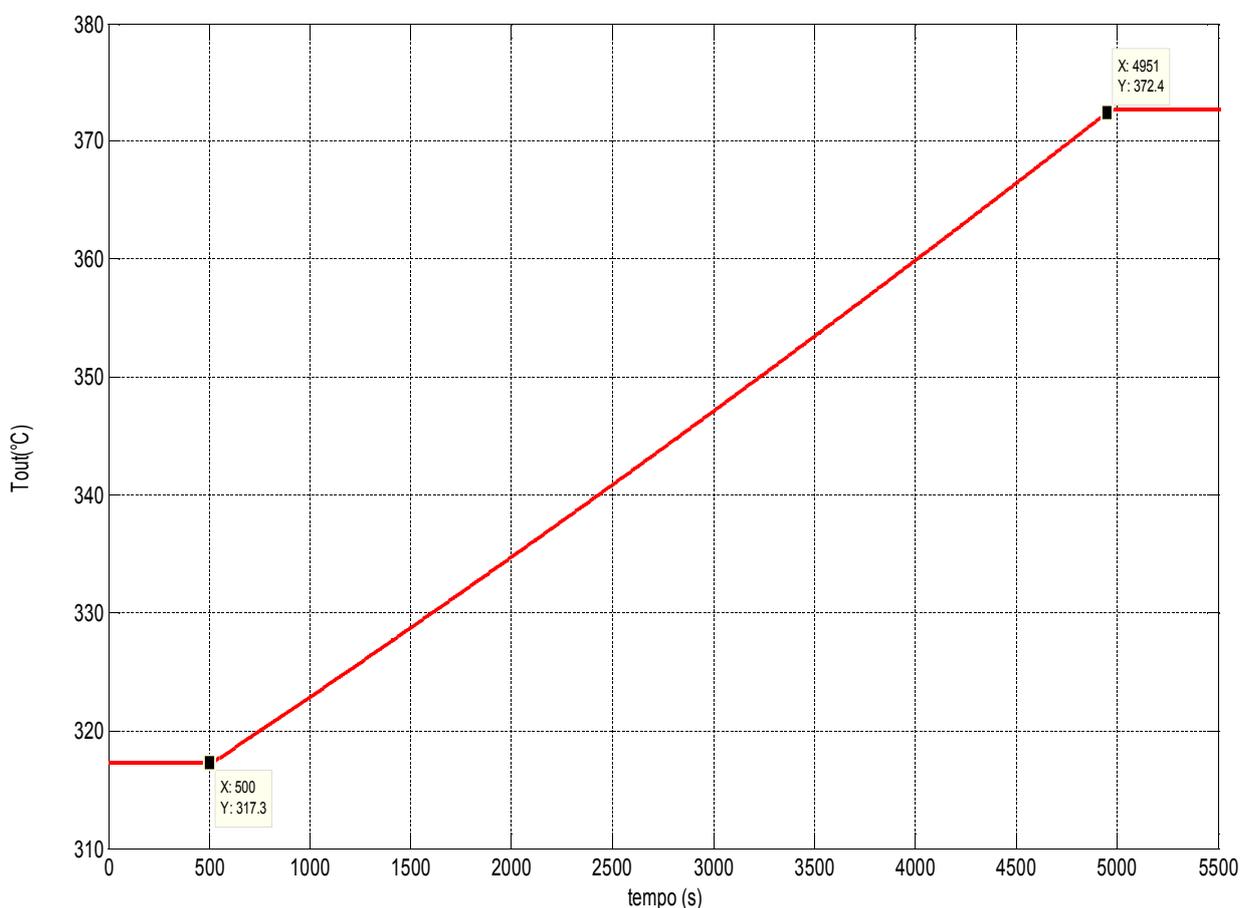
No estado estacionário, a densidade de potência térmica lançada no secundário é constante. Com a deborção o fluido que atravessa o núcleo foi aquecido, tendo sua temperatura aumentada e isso se manifesta em um aumento da densidade linear de potência lançada no secundário dos geradores de vapor, conforme se evidencia na Figura 18.



*Figura 18 – Densidade linear de potência térmica transferida do circuito primário para o circuito secundário dos geradores de vapor do IRIS (deborção)*

## 10. Temperatura do vapor superaquecido na saída dos GV versus tempo

A água que entra no secundário dos geradores de vapor segue uma trajetória helicoidal e ascendente. Ao longo do trajeto, recebe calor do circuito primário e se aquece, sofre uma transição de fase até se transformar completamente em vapor superaquecido. No estado estacionário, a temperatura do vapor na saída dos geradores de vapor é igual a 317,25 °C. Com o transitório, o aumento da densidade de potência térmica para o secundário dos GV acarretaram em um aumento da temperatura de saída do vapor superaquecido de acordo com a Figura 20.



*Figura 19 – Temperatura de saída do vapor superaquecido dos GV do IRIS*

A Figura 19, quando comparada com a Figura 14, mostra também que o aquecimento do fluido no lado secundário é muito mais sensível ao incremento de potência devido à redução da concentração de ácido bórico no circuito primário.

## 11. Título Termodinâmico do Vapor Superaquecido

O título termodinâmico para o fluxo de vapor superaquecido é definido por

$$x_{out} = \frac{h_{out} - h_l}{h_v - h_l} \quad (64)$$

Para a região do vapor superaquecido, o título termodinâmico é maior que 1 como de fato pode ser constatado na Figura 20.

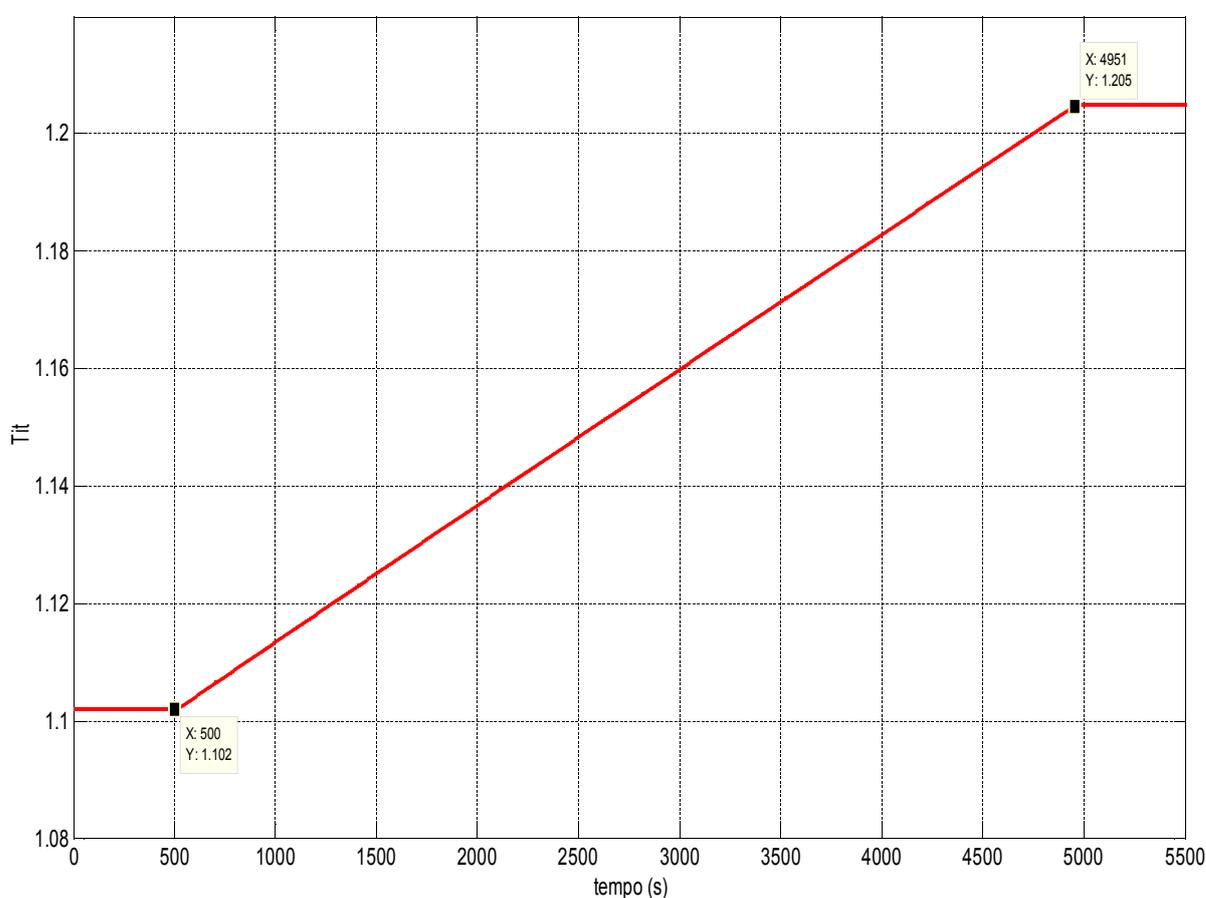


Figura 20 – Título termodinâmico do vapor superaquecido na saída dos GV do IRIS

Com o aumento da temperatura do fluido que percorre os geradores de vapor durante o transitório de deborção, verifica-se que  $x_{out}$  apresenta um crescimento de aproximadamente 10% ao término do transitório. Portanto, esse aumento representa uma quantidade maior de vapor superaquecido a uma temperatura correspondentemente maior.

## Boração

### 1. Concentração de ácido bórico no circuito primário versus tempo

O aumento da concentração de ácido bórico no circuito primário tem um crescimento exponencial muito suave para o intervalo de tempo de borração ( $\Delta t = 4330,65 s$ ). A Figura 21 ilustra esse fato evidenciado pela observação de que a partir do instante  $t = 500 s$  ao instante  $t = 4830,65 s$  a curva apresenta um comportamento praticamente linear. Esse comportamento se deve ao fato de a vazão do tanque de boro ser muito pequena (Tabela 2), o que conduziu, por sua vez, a uma constante de tempo grande ( $\theta \approx 41666,67 s$ ) em comparação com o intervalo de tempo de injeção ( $\Delta t = 4330,65 s$ ).

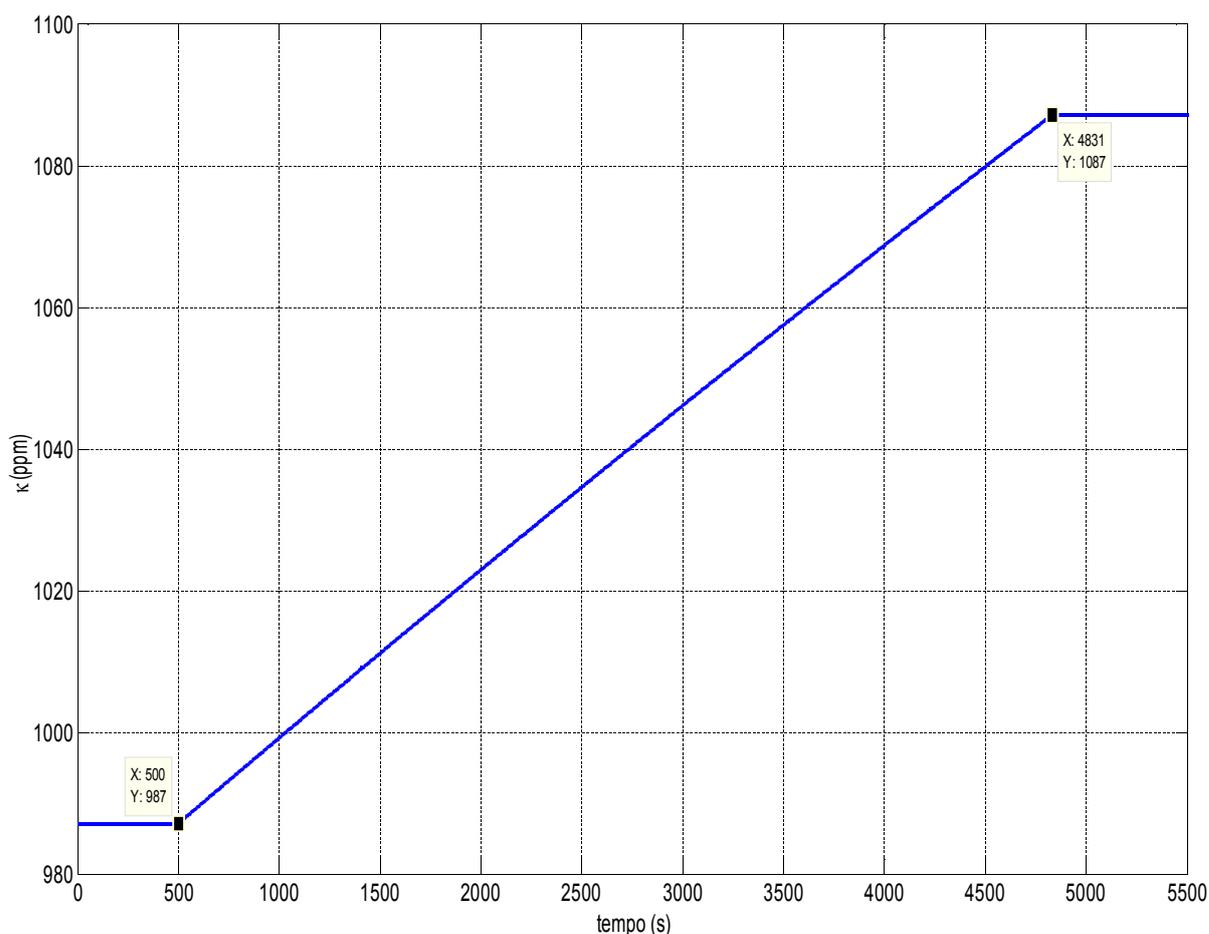
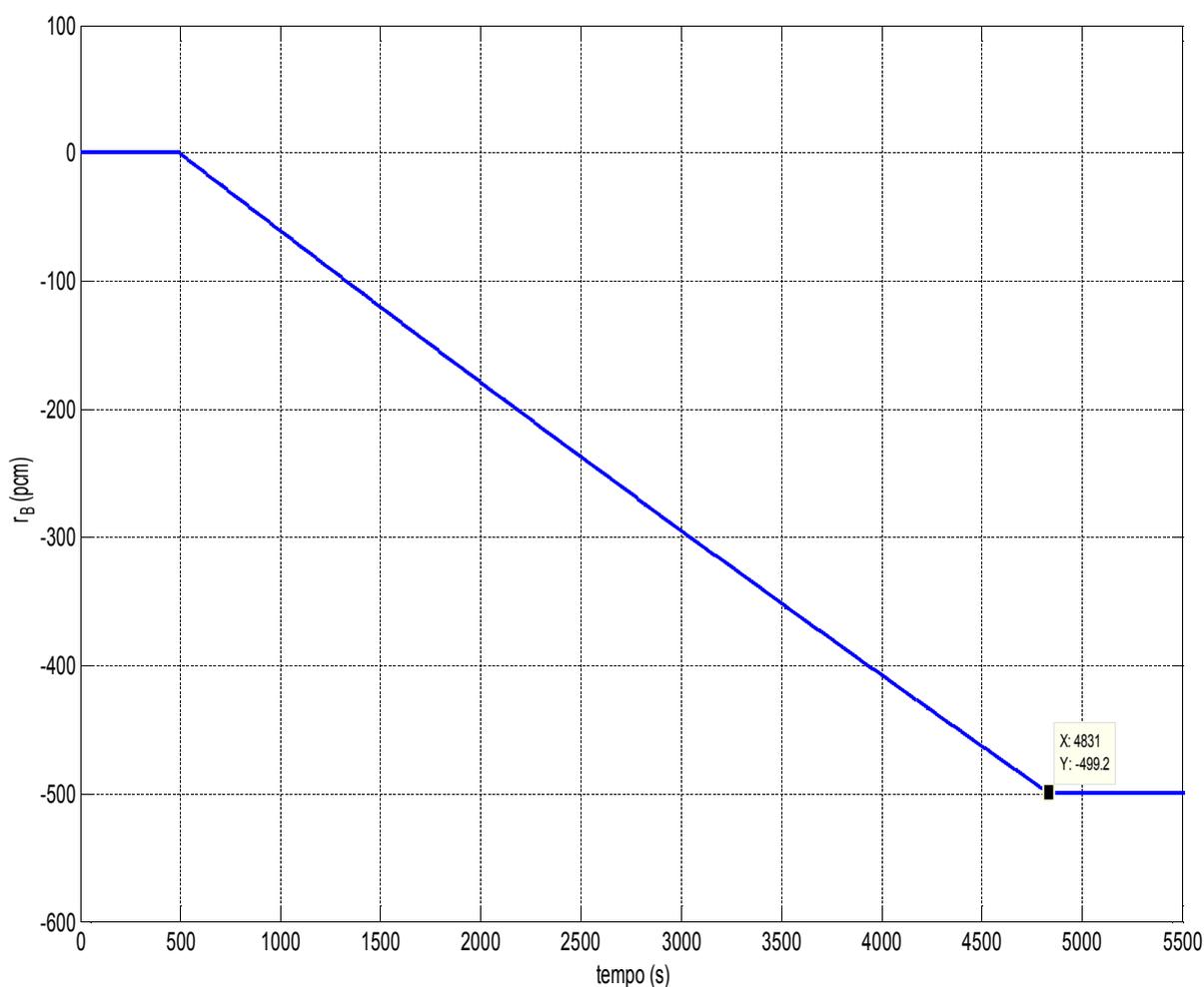


Figura 21 – Concentração de ácido bórico no primário do IRIS para uma borração

## 2. Reatividade devido ao boro versus tempo

Uma boração tem como objetivo reduzir a população de nêutrons térmicos, diminuindo o fator de multiplicação efetivo. Com isso, a potência térmica gerada pelo núcleo, que é fortemente dependente do fluxo de nêutrons, decresce.

Verifica-se, também, que a inserção negativa de reatividade neste caso é um processo contínuo, decrescente e fortemente dependente da variação temporal da concentração do ácido bórico, perdurando o seu efeito sobre a reatividade do sistema enquanto houver o transitório de boração em questão.



*Figura 22 – Reatividade devido ao ácido bórico em uma boração para o IRIS*

### 3. Potência térmica gerada versus tempo

A inserção negativa de reatividade provocada pela injeção de boro reduz as taxas de fissão, acarretando uma queda da potência térmica gerada no núcleo com o passar do tempo (Figura 23).

Nesta figura percebe-se que a potência térmica atinge um novo estado estacionário após o fim da boração. Isto só acontece devido aos *feedbacks* neutrônicos do combustível e do moderador que atuam no sentido de conduzir o reator ao estado crítico. Os pormenores sobre as respostas neutrônicas serão aprofundados mais adiante.

Percebe-se também que a potência térmica final encontra-se dentro de uma faixa de variação de 10% da potência total.

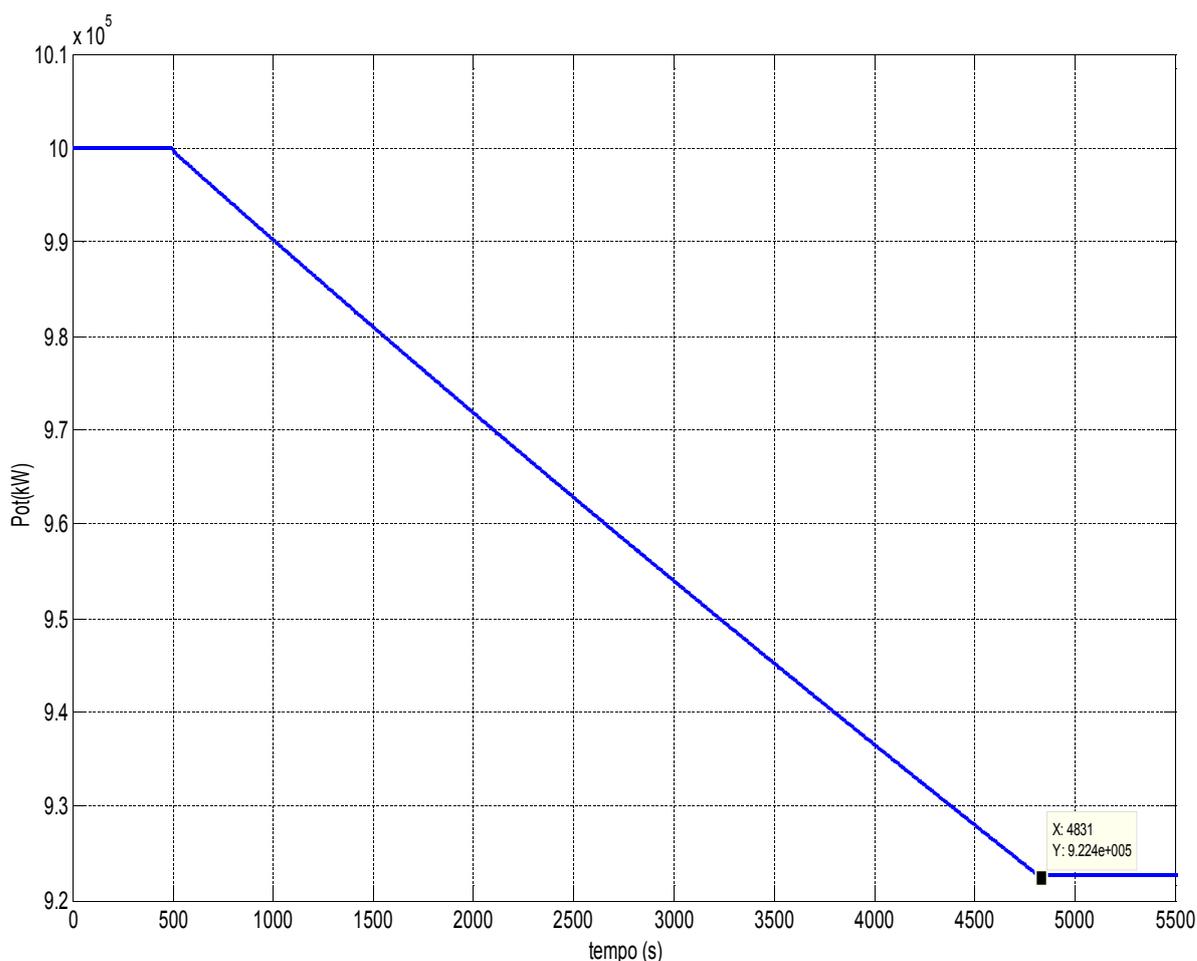
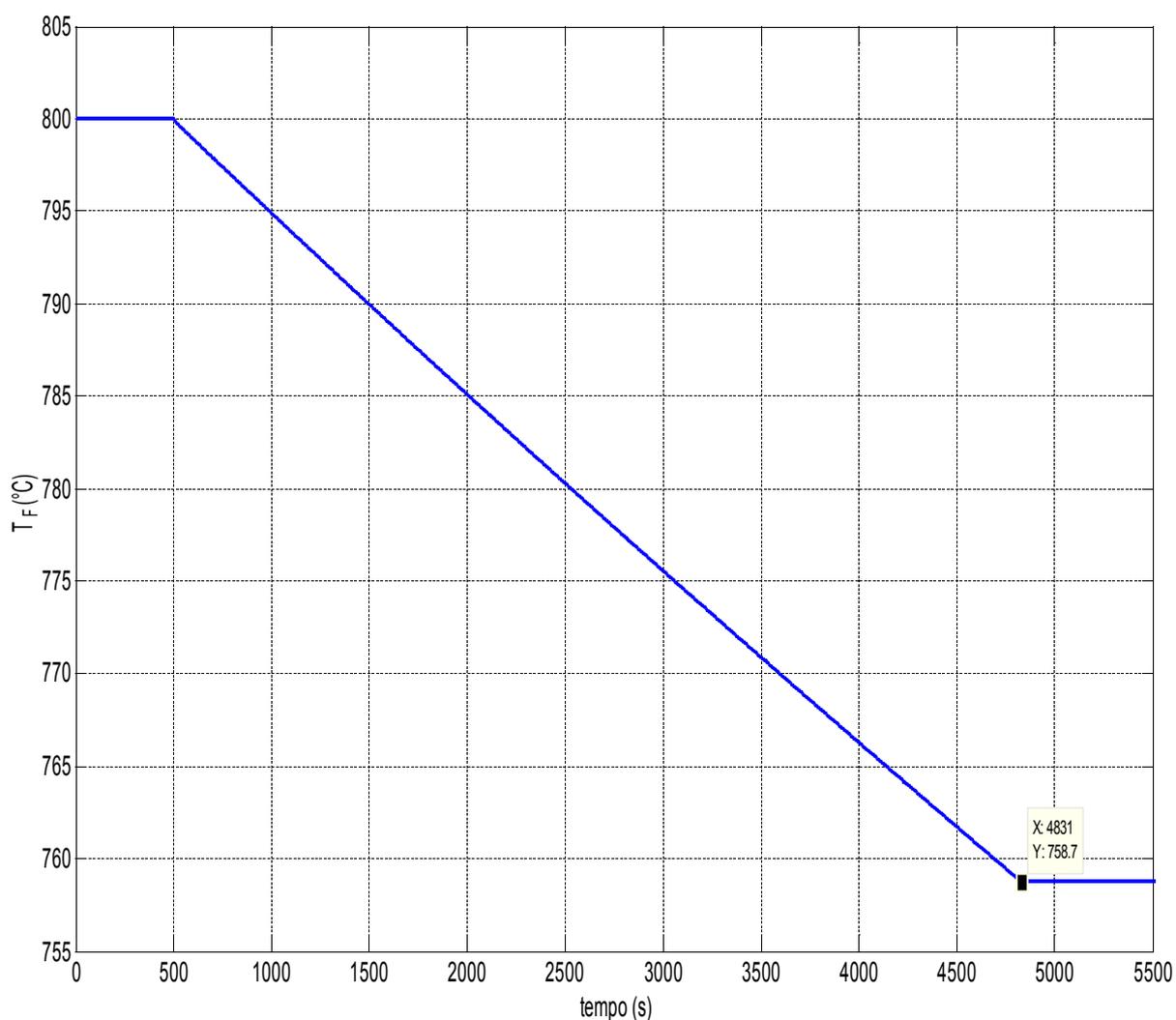


Figura 23 – Potência térmica gerada em uma boração para o IRIS

#### 4. Temperatura média do combustível versus tempo

A redução de potência térmica gerada no combustível, devido à queda do fluxo de nêutrons, acarreta em uma diminuição da temperatura média do combustível conforme mostra a Figura 24.

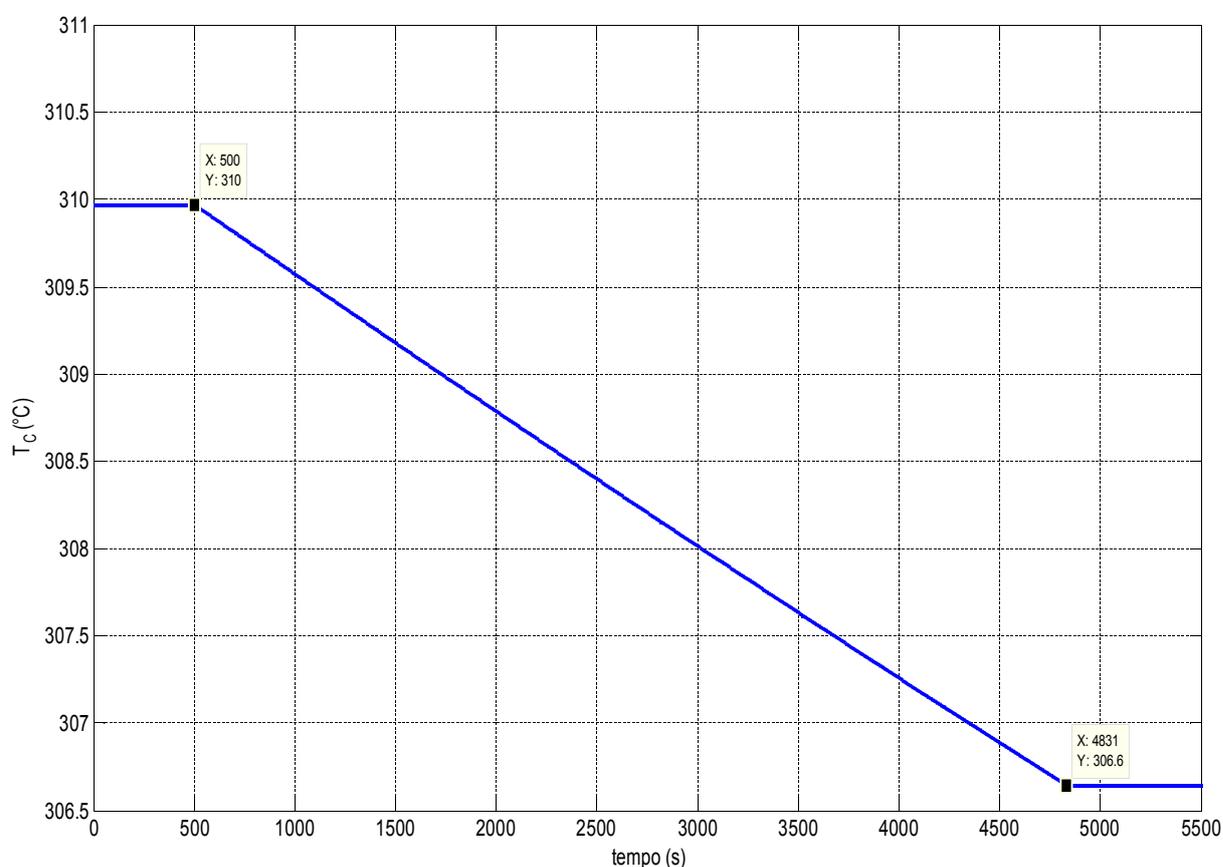
Note que após o término da boração a temperatura atinge um novo patamar. Isto se deve ao fato de a potência térmica gerada ter atingido um novo estado estacionário.



*Figura 24 – Temperatura média do combustível no reator IRIS (boração)*

## 5. Temperatura média do refrigerante versus tempo

O reator IRIS utiliza água leve como moderador de nêutrons e como refrigerante. Com isso, a água movendo-se em uma trajetória fechada atravessa o núcleo ascendente com um fluxo determinado pelas oito bombas, recebendo calor do combustível. Como a temperatura média do combustível diminui, seu efeito sobre a temperatura média do refrigerante que atravessa o núcleo pode ser observada na Figura 25 a seguir.



*Figura 25 – Temperatura média do refrigerante que atravessa o núcleo do reator IRIS (boração)*

A simulação evidencia que a temperatura média do refrigerante atinge um novo patamar no final da diluição, como consequência da estabilização da temperatura média do combustível, pois o gradiente de temperatura entre o combustível e o moderador torna-se constante do instante  $t = 4830,65$  s em diante.

## 6. Reatividade devido ao combustível versus tempo

A variação da reatividade do combustível é geralmente expressa em termos de um coeficiente de reatividade conforme expressa a Equação 3.

A Figura 26 ilustra o efeito da queda de temperatura do combustível sobre a reatividade devido ao efeito Doppler do combustível.

Constata-se também que a diminuição da temperatura do combustível insere automaticamente uma reatividade positiva no sistema, demonstrado um dos efeitos do controle da inserção negativa de reatividade devido à boração.

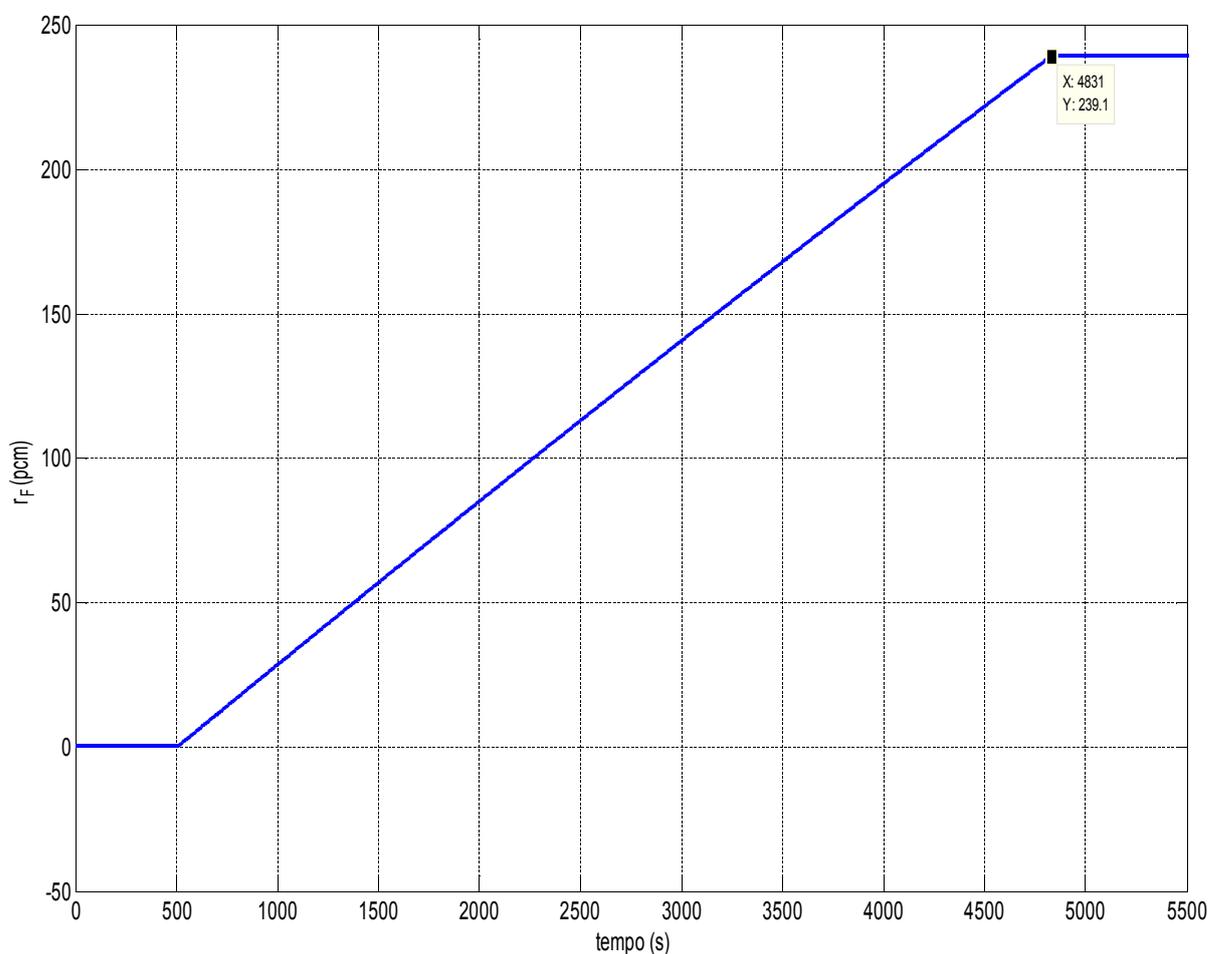


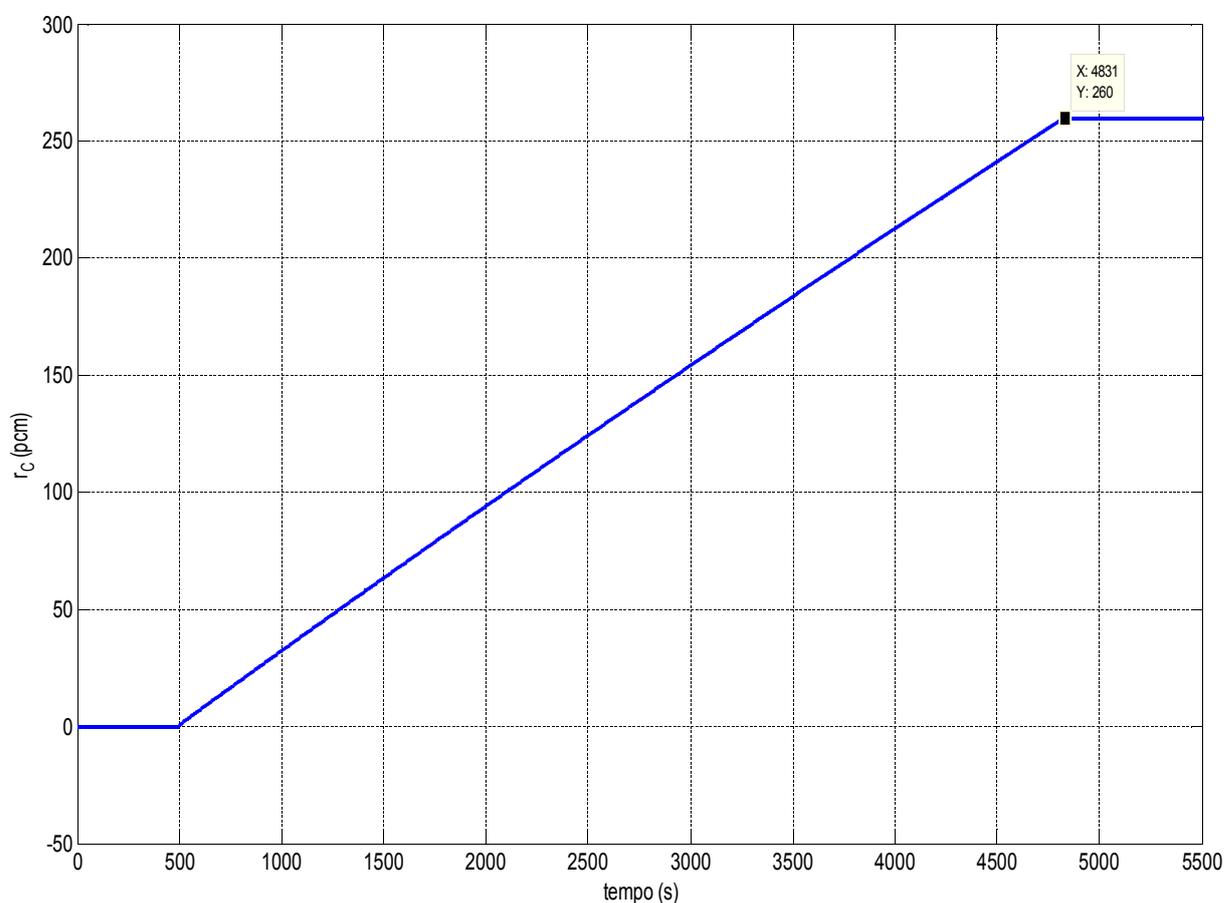
Figura 26 – Reatividade devido ao combustível em uma boração no reator IRIS

## 7. Reatividade devido ao moderador versus tempo

A variação da reatividade do moderador é geralmente expressa em termos de um coeficiente de reatividade conforme expressa a Equação 4.

Em um reator térmico moderado a água o efeito dominante sobre a reatividade aparece devido a mudança na densidade do moderador, causada pela expansão térmica e formação de vapor d'água.

A Figura 27 ilustra o efeito da elevação da temperatura do moderador sobre a reatividade do moderador.



*Figura 27 – Reatividade devido ao moderador em uma boração no reator IRIS*

Constata-se também que a queda da temperatura do moderador, assim como ocorreu com o combustível, insere automaticamente uma reatividade positiva no sistema, demonstrando outro efeito do controle da inserção negativa de reatividade devido à boração.

## 8. Reatividade Total versus tempo

A reatividade total do sistema é definida pela Equação 7. Sendo que as barras são mantidas fixas na altura de referência ( $\xi = \xi_0$ ) tendo, com isso, contribuição nula para a reatividade total, restando apenas a análise sobre a reatividade total devido ao moderador, ao combustível e ao ácido bórico.

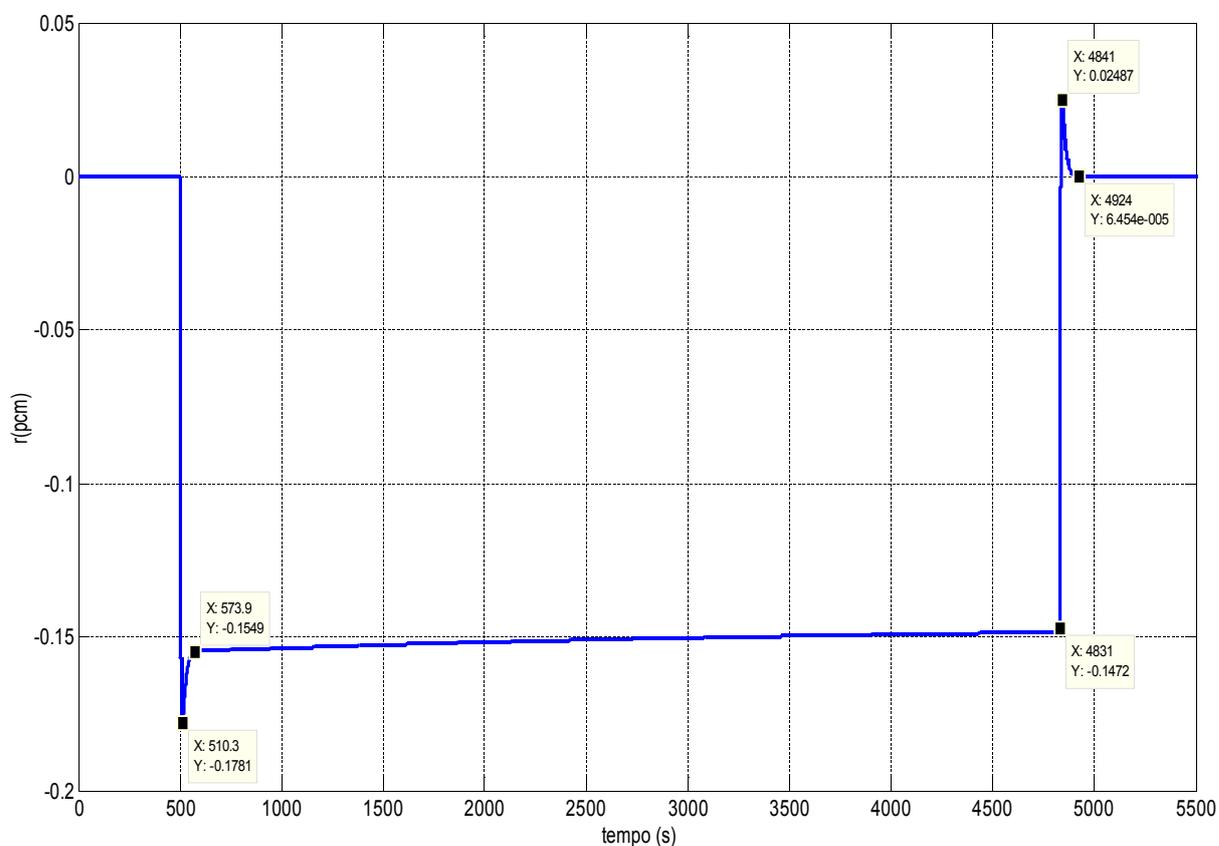
A reatividade total do sistema era igual a zero (reator crítico) até o início do transitório que tem início no instante  $t = 500\text{ s}$ .

Sendo o transitório causado por uma boração, haverá um decrescimento na reatividade devido ao boro (Figura 22) inserindo reatividade negativa no sistema.

Com isso, o sistema responde rapidamente no início do transitório provocando uma queda na reatividade total que encontrava-se nula até o instante  $t = 500\text{ s}$  conforme se nota na Figura 28. Isso, por sua vez, implica em uma redução do fluxo de nêutrons térmicos, o que se traduz em uma diminuição da potência térmica gerada. Desse modo, o combustível e o moderador sofrem uma queda de temperatura conforme ilustram as Figuras 24 e 25. Em seguida, os *feedbacks* neutrônicos entram em ação para limitar o decrescimento da reatividade total devido ao boro, inserindo reatividade positiva no sistema (Figuras 26 e 27). Essa limitação imposta pelos *feedbacks* pode ser percebida na Figura 28 entre os instantes  $t = 500\text{ s}$  e  $t = 4831\text{ s}$ . E de modo mais contundente pelo ponto de mínimo encontrado entre os instantes  $t = 500\text{ s}$  e  $t = 510,3\text{ s}$  da mesma figura.

A partir do final da deboração ( $t = 4831,04\text{ s}$ ) a concentração de boro no primário atinge e permanece no valor estipulado, cessando a inserção negativa de reatividade devido ao boro. Entretanto, os *feedbacks* neutrônicos continuam inserindo reatividade positiva no sistema e, com isso, a reatividade total sofrerá uma variação no sentido de se tornar nula novamente, como se pode verificar na Figura 28 entre os instantes  $t = 4831,04\text{ s}$  e  $t = 4924\text{ s}$ . Contudo, a reatividade total torna-se em seguida positiva, volta a diminuir e finalmente se estabiliza no valor nulo e o reator volta ao estado crítico.

Isso se deve ao fato de embora a reatividade total ser nula num determinado instante, ainda há um saldo de reatividade positiva inserida pelo combustível e pelo moderador, pois até pouco antes do instante  $t = 4831\text{ s}$  as temperaturas do combustível e do moderador ainda apresentam uma breve queda, até que a reatividade total atinge um valor máximo ( $t = 4841\text{ s}$ ).



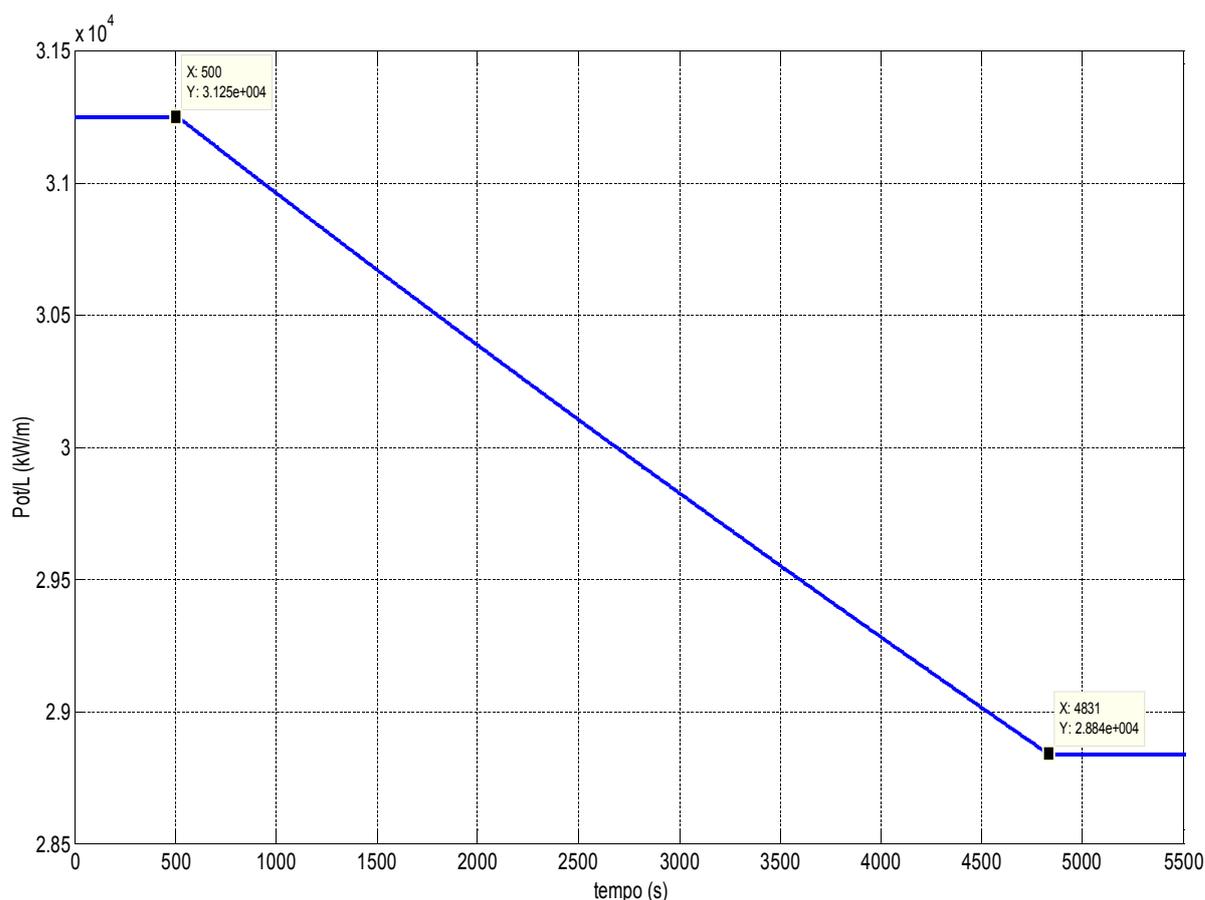
*Figura 28 – Reatividade total em uma borção para o IRIS*

A suave inserção positiva de reatividade percebida na Figura 28 após o final do transitório provoca uma pequena elevação de potência, ocasionando um leve aumento da temperatura do combustível e, desse modo, reduzindo a reatividade total do sistema, até que a potência finalmente se estabiliza, as temperaturas do combustível e do moderador se tornam estacionárias e a reatividade total se torna nula, conforme mostra a Figura 28 após o instante  $t = 4924 s$ .

## 9. Potência térmica por unidade de comprimento versus tempo

O fluido refrigerante, após sair do núcleo em direção ao plenum superior do vaso, segue um curto trajeto radial, em direção a oito bombas primárias, sendo bombeado no sentido descendente, resfriando-se ao transferir calor para os geradores de vapor.

No estado estacionário, a densidade de potência térmica lançada no secundário é constante. Com a boração o fluido que atravessa o núcleo é cada vez menos aquecido devido à redução de temperatura do combustível. Isso se manifesta em uma redução da densidade linear de potência lançada no secundário dos geradores de vapor, até atingir um novo estado estacionário conforme se evidencia na Figura 29.



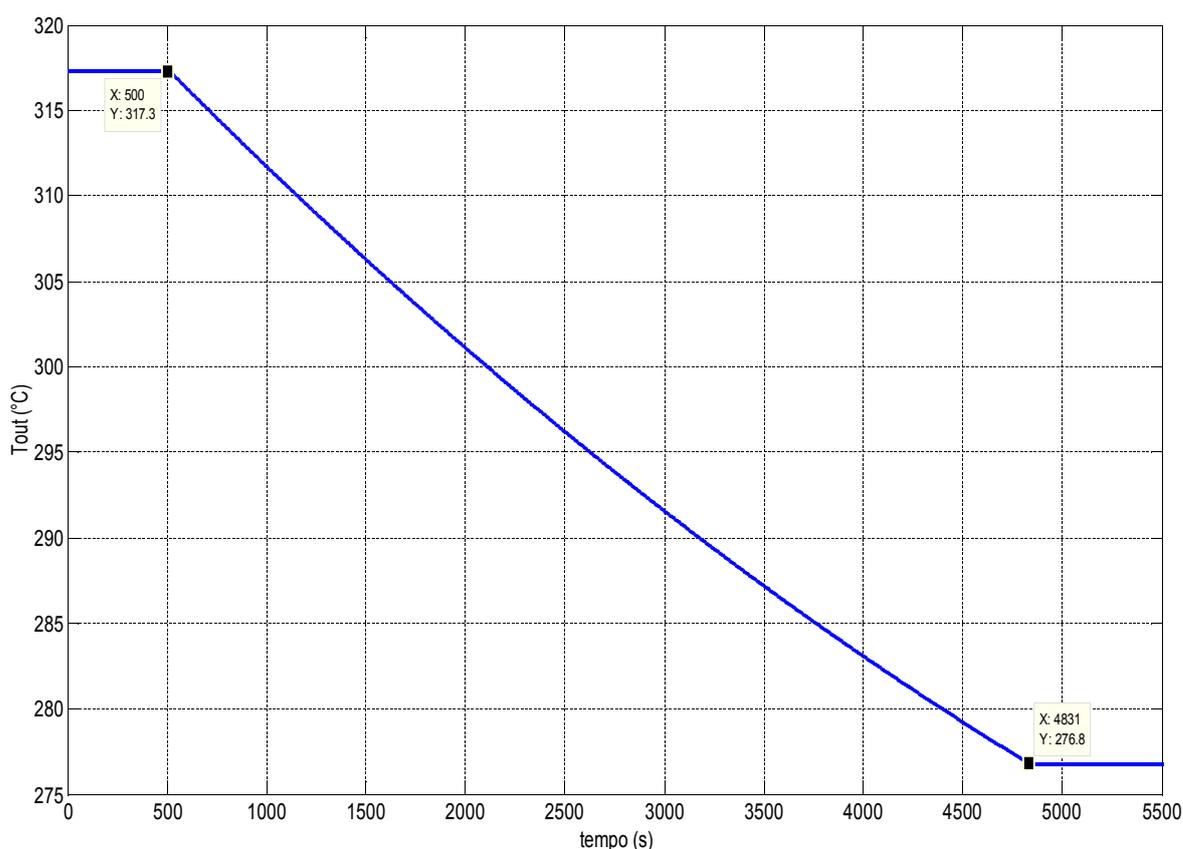
*Figura 29 – Densidade linear de potência térmica transferida do circuito primário para o circuito secundário dos geradores de vapor do IRIS (boração)*

## 10. Temperatura do vapor superaquecido na saída dos GV versus tempo

A água que entra no secundário dos geradores de vapor segue uma trajetória helicoidal e ascendente. Ao longo do trajeto, recebe calor do circuito primário e se aquece, sofre uma transição de fase até se transformar completamente em vapor superaquecido.

No estado estacionário, a temperatura do vapor na saída dos geradores de vapor é igual a 317,25 °C. Com o transitório, o queda da densidade de potência térmica para o secundário dos GV acarretaram em uma diminuição da temperatura de saída do vapor superaquecido de acordo com a Figura 30.

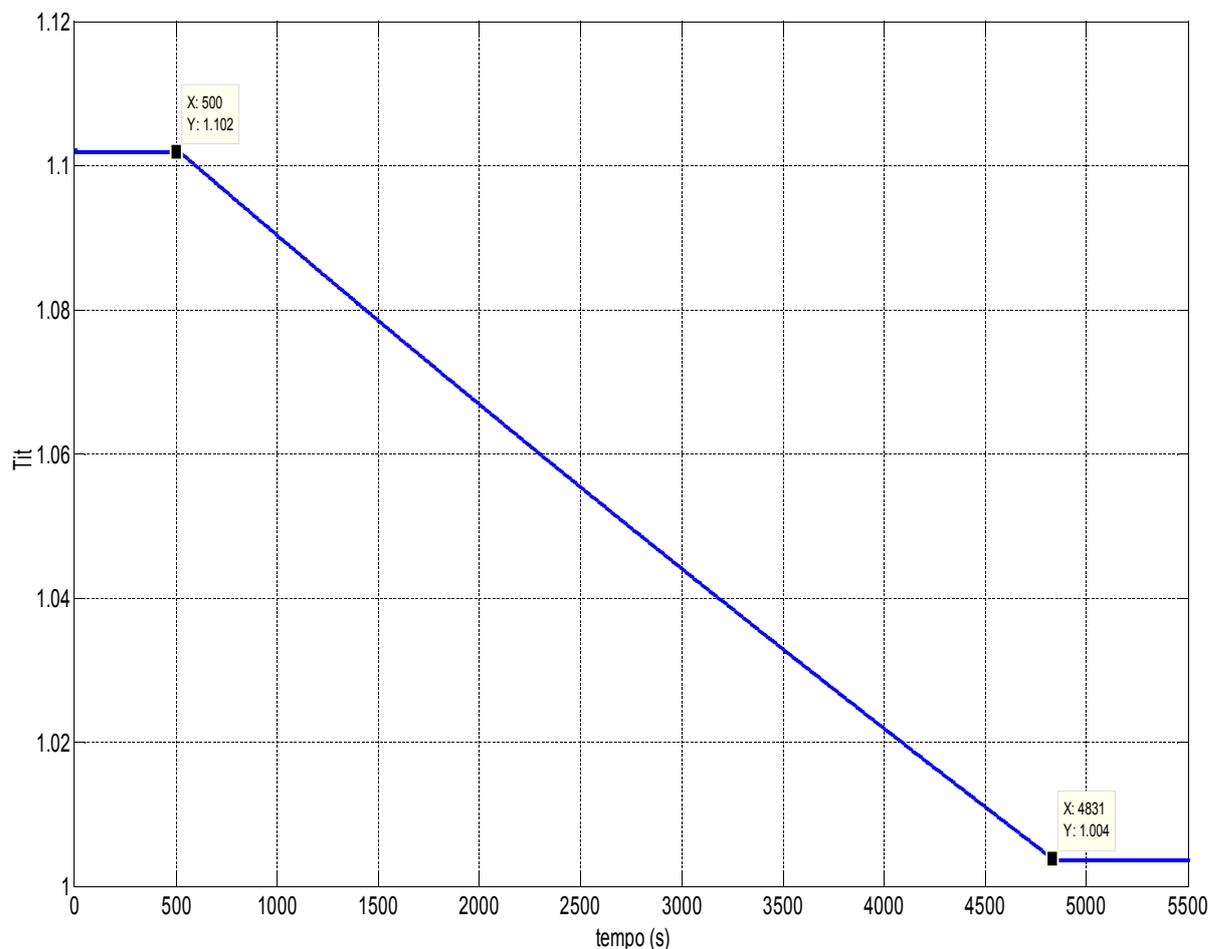
A Figura 30, quando comparada com a Figura 25, mostra também que o resfriamento do fluido no lado secundário é muito mais sensível à redução de potência devido ao aumento da concentração de ácido bórico no circuito primário.



*Figura 30 – Temperatura de saída do vapor superaquecido dos GV do IRIS (boração)*

## 11. Título Termodinâmico do Vapor Superaquecido

O título termodinâmico para o fluxo de vapor superaquecido é definido pela Equação 64 e a Figura 31 mostra que seu valor é maior que 1.



*Figura 31 – Título termodinâmico do vapor superaquecido na saída dos GV do IRIS (boração)*

Com a redução da temperatura do fluido que percorre o lado secundário dos geradores de vapor durante o transitório de boração, verifica-se que  $x_{out}$  apresenta uma diminuição de aproximadamente 10% no final do transitório. Portanto, essa queda representa uma quantidade menor de vapor superaquecido a uma temperatura correspondentemente menor. Contudo, o vapor continua levemente superaquecido, o que satisfaz as especificações técnicas do projeto IRIS.

Os resultados apreciados de fato são confiáveis e representam o

comportamento esperado para as grandezas analisadas, ou seja ao longo do tempo de operação da usina, as variações da concentração de boro tem papel fundamental no controle operacional de pequenas variações de potência, mantendo a criticalidade do reator.

As principais vantagens do uso da ferramenta de simulação dinâmica SIMULINK do MATLAB empregadas no estudo desenvolvido nesse trabalho foram:

- A facilidade e flexibilidade disponíveis para o programador, com sua interface extremamente amigável.
- Ele permite a criação e verificação rápida do modelo, representando uma enorme economia de tempo, o que o torna bastante atrativo.
- A simulação de processos com constantes de tempo não muito distintas são executados com grande rapidez, como no caso da validação do MODIRIS.

A principal desvantagem da ferramenta apontada aqui foi evidenciada nos processos que envolviam constantes de tempo com muitas ordens de grandeza de diferença: verificou-se que os processos mais lentos (termoidráulicos) dominam no caso real, mas nas simulações, quem domina é o *time-step* do fenômeno mais rápido (neutrônica) e, por tanto, acabam dominando toda a dinâmica, tornando a simulação mais lenta. Este fato corroborou para a constatação de que nestas situações, o desempenho do código torna-se fortemente dependente da máquina.

O modelo do primário desenvolvido e utilizado no código é muito simplificado, levando em conta apenas variações temporais (modelo *lumped*), o que dificulta a análise de casos onde a variação espacial das grandezas de interesse tem grande importância. Neste sentido, os geradores de vapor são uma contraposição do modelo do primário, devido a distribuição espacial ser levada em conta. Contudo, de modo algum aquela simplificação deve ser vista como uma desvantagem insuperável, já que o programa permite a introdução de alterações que possam ser implementadas rapidamente para servir aos propósitos específicos do pesquisador.

## 6 CONCLUSÕES

Pode-se concluir a partir deste trabalho que nos transitórios operacionais (transitórios lentos) de boração quanto nos de deboração tem-se que:

- Os transitórios de concentração de ácido bórico no circuito primário tem uma variação exponencial muito suave. Isto se deve principalmente à constante de tempo ser muito grande e também pela diferença de concentração inicial do primário e a concentração final que se deseja atingir ao final do transitório.
- O tempo necessário para se atingir a concentração desejada por meio dos transitórios dependem fortemente da diferença de concentração de boro existente entre o tanque de boro e o refrigerante.
- A variação de concentração de boro no primário do reator IRIS tem por objetivo alterar o fluxo de nêutrons, modificando, com isso, a potência térmica gerada. Isso acarreta uma variação na reatividade que é compensada pela resposta dos *feedbacks* neutrônicos no combustível e do moderador. Em ambos os casos verificou-se que a resposta dos *feedbacks* neutrônicos do sistema aos transitórios postulados foram muito eficientes, evidenciando a tendência de retomada à criticalidade.
- As temperaturas médias do combustível e do refrigerante restabelecem um novo estado estacionário ao serem finalizados os transitórios de concentração de boro, embora a variação sofrida na temperatura média do refrigerante não seja expressiva. Já a temperatura média do combustível mostrou-se mais sensível aos transitórios postulados. Esse fato corroborou para a constatação de que o controle com variação lenta da concentração de boro afeta de modo significativo o fluxo de nêutrons e, por conseguinte, a potência térmica gerada.
- A potência térmica por unidade de comprimento lançada no lado secundário dos geradores de vapor se configura em uma variação linear no intervalo de

tempo dos transitórios em estudo. Mas, ao finalizar cada transitório, um novo estado estacionário é atingido.

- A temperatura do vapor superaquecido no lado secundário é muito mais sensível às variações de potência devido às variações da concentração de ácido bórico no circuito primário do que as temperaturas estudadas no circuito primário.
- O título termodinâmico manteve-se acima de 1 durante os transitórios em estudo, o que é desejável devido ao fato de no projeto do IRIS o vapor deverá estar superaquecido.

As principais vantagens apontadas quanto ao uso do SIMULINK do MATLAB no estudo desenvolvido nesse trabalho foram:

- A facilidade e flexibilidade disponíveis para o programador, com sua interface extremamente amigável.
- Ele permite a criação e verificação rápida do modelo, representando uma enorme economia de tempo, o que o torna bastante atrativo.
- A simulação de processos com constantes de tempo não muito distintas são executados com grande rapidez.

Os processos que envolviam constantes de tempo com muitas ordens de grandeza de diferença tem sua dinâmica dominada pelos processos mais lentos no caso real, mas nas simulações, quem domina é o fenômeno mais rápido que requer um *time-step* menor, tornando a simulação lenta e o desempenho do código fica muito dependente da máquina, o que representa uma desvantagem.

Tendo em vista a experiência adquirida no desenvolvimento do trabalho e visando a sua complementação, sugere-se que ao código MODIRIS seja incorporado o pressurizador, uma vez que ele não apresenta tal componente. Além

disso, os seguintes aspectos podem servir de guia para novas pesquisas e desenvolvimento de trabalhos futuros baseados do código MODIRIS:

- Com a introdução do pressurizador podem ser realizados estudos de deficiência de homogeneização de boro na câmara do pressurizador do reator IRIS.
- Podem ser desenvolvidos estudos e análises de eventos com deficiência na homogeneização de boro, relativas ao acidente de perda de refrigerante por pequenas rupturas (*Small Break Loss-of-Coolant-Accident – SBLOCA*) .
- Análise de processos e da engenharia dos sistemas de controle da potência do reator IRIS usando técnicas como a de Redes Neurais Artificiais, Algoritmos Genéticos e Lógica Fuzzy.
- Estudos de transitórios de reatividade devidos ao Xenônio e ao Samário.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAE, K.H.; KIM, H.C.; CHANG, M.H.; SIM, K.H. **Safety evaluation and inherent and passive safety features of the SMART design**. Annals of Nuclear Energy, v.28, p.333-349, 2001.

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

BEZERRA, J. de I.; IPOJUCA, T. da S.; FERNANDES, V. B.; FILHO, P. P. **Estudo Preliminar da Recarga de Angra I**. In: CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR, 1., Rio de Janeiro, Brasil. **Anais**. p. 159-161.1986.

BLAKE, E. M.. **Watching and waiting for Washington**. Nuclear News, U.S.A., v. 52, n.1, p.34-39, january. 2009.

BREIDENTHAL, R.E.; BUONADONNA, V.R.; WEISBACH, M.F. **Molecular mixing via jets in confined volumes**. Journal of Fluid Mechanics, v.219, p.531-544, 1990.

CAMMI, A.; CASSELLA, F.; RICOTTI, M.E.; SCHIAVO, F. **Object-Oriented Modeling, Simulation and Control of the IRIS Nuclear Power Plant with MODELICA**. In: PROCEEDINGS OF THE 4TH INTERNATIONAL MODELICA CONFERENCE. Hamburg, Germany, 2005.

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

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.; ORIOLLO, F. **The design and safety features of the IRIS reactor**. Nuclear Engineering Design, v.230, p.151-167, 2004.

DONG, Z.; HUANG, X; FENG, J.; ZHANG, L. **Dynamic model for control system design and simulation of a low temperature nuclear reactor**. Nuclear Engineering and Design, v. 239, p. 2141–2151, 2009.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Modern Control Systems**. 9ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 864p, 2001.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., **Sistema de Regeneração Térmica de Boro**, Apostila de Treinamento nº 06.1/B. Outubro de 1976a.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., **Teoria do Reator**, Apostila de Treinamento nº 06.1/B. Outubro de 1976b.

GANGO, P. **Numerical boron mixing studies for Loviisa nuclear power plant**. Nuclear Engineering and Design, v.177, p.239-254, 1997.

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

ISHIGURO, Y. **A energia nuclear para o Brasil**. São Paulo, Brasil. Makron Books Ltda., 2002.

IVANOV, K.N.; GRUNDMANN, U.; MITTAG, S.; ROHDE, U. **Comparative study of a boron dilution scenario in VVER reactors**. Annals of Nuclear Energy, v.26, p.1331-1339, 1999a.

IVANOV, K.N.; MACIAN-JUAN, R.; IRANI, A.; BARATTA, A.J. **Features and performance of a coupled three-dimensional thermal-hydraulic/kinetics TRAC-PF1/NEM pressurized water reactor (PWR) analysis code**. Annals of Nuclear Energy, v.26, p.1407-1417, 1999b.

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

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

LAMARSH, J. R. **Introduction to Nuclear Engineering**. 1ed. New York, U.S.A.: Addison- Wesley Publishing Company, 626p, 1975.

LARSON, T. K.; MOODY, F.J.; WILSON, G.E.; BROWN, W.L.; FREPOLI, C.; HARTZ, J.; WOODS, B.G.; ORIANI, L. **IRIS small break LOCA Phenomena Identification and Ranking Table (PIRT)**. Nuclear Engineering Design, v.237, p.618-627, 2007.

MONTEIRO, L. H. A. **Sistemas Dinâmicos**. 2ed. São Paulo, Brasil: Editora Livraria da Física, 634p, 2006.

NIGRO, A. L. ; D'AURIA, F. **PWR Core Response to Boron Dilution Transient**. In: International Conference Nuclear Energy For New Europe. Portoroz, Slovenia, 2003.

NOVELLI, A. **The AMEBA PWR, a new concept in the technology of nuclear reactor safety**. Annals of Nuclear Energy, v.27, p.589-606, 2000.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 3ed. Rio de Janeiro, Brasil: Prentice-Hall do Brasil, 813p, 1998.

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., v.37, p.1478-1482, 1998.

RODHE, U.; ELKIN, I; KALINENKO, V. **Analysis of Boron Dilution Accident for WWER-440 Combining the Use of the Codes DYN3D and SiTAP**. Nuclear Engineering and Design, v.170, p.95-99, 1997.

ROHDE, U.; KLIEM, S.; HÖHNE, T.; KARLSSON, R.; HÖMSTREM, B.; LILLINGTON, J.; TOPPILA, T.; ELTER, J.; BEZRUKOV, Y. **Fluid mixing and flow distribution in the reactor circuit, measurement data base**. Nuclear Engineering Design, v.235, p.421-443, 2005.

SANTOS, W. S. **Avaliação dos Aspectos de Segurança Afetados pela Redução da Concentração de Boro do Tanque de Injeção de Boro na Usina Nuclear Angra 1**. 1999. 132 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Nuclear) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

SILVA, M. A. B. **Determinação dos parâmetros de uma seção de testes para o pressurizador do reator nuclear IRIS**. 2008. 120p. (Tese de Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

UMMINGER, K.; MANDL, R.; WEGNER, R. **Restart of natural circulation in a PWR-PKL test results and S-RELAP5 calculations**. Nuclear Engineering Design, v.215, p.39-50, 2002.

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

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

WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LCC. **IRIS preliminary safety assessment. Westinghouse Non-Proprietary Class 3 – WCAP-16082-NP**. vol.1. Jul. 15, Pittsburgh, 2003c.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MODELO TERMOIDRÁULICO (CIRCUITO PRIMÁRIO)

### 1. Plenum inferior do vaso de pressão

Durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , a massa de água  $\Delta m_{ip}$  que entra no plenum inferior é igual a que sai  $\Delta m_{lp}$ .

Sendo a vazão média total das bombas dada por  $Q_p = \frac{\Delta m_{ip}}{\Delta t}$ , tem-se:

$$\Delta m_{ip} = Q_p \cdot \Delta t \quad (65)$$

Admitindo uma mistura térmica perfeita entre o fluido residente no plenum com o fluido que entra no plenum, pela equação das trocas de calor, vem:

$$m_{lp} \cdot c \cdot \Delta T_{lp} + \Delta m_{ip} \cdot c \cdot (T_{ip} - T_{lp}) = 0 \quad (66)$$

Donde se obtém:

$$\Delta T_{lp} = \frac{\Delta m_{ip}}{m_{lp}} \cdot (T_{ip} - T_{lp}) \quad (67)$$

Substituindo a Equação 65 na Equação 67, encontra-se que

$$\frac{\Delta T_{lp}}{\Delta t} = \frac{Q_p}{m_{lp}} \cdot (T_{ip} - T_{lp})$$

Tomando o limite, com  $\Delta t \rightarrow 0$  encontra-se finalmente

$$\frac{dT_{lp}}{dt} = \frac{Q_p}{m_{lp}} \cdot (T_{ip} - T_{lp}) \quad (68)$$

## 2. Núcleo do Reator

Seja  $P$  a potência térmica do núcleo do instante  $t$ . Para um intervalo de tempo  $\Delta t$ , a energia térmica produzida é utilizada para aquecer o combustível por condução variando sua temperatura de  $\Delta T_f$ , e a água (moderador/refrigerante) por convecção, sofrendo um incremento na temperatura  $T_f - T_c$ . O balanço de energia nos dá a equação a seguir:

$$P \cdot \Delta t = m_f \cdot c_f \cdot \Delta T_f + u_f \cdot A_f \cdot (T_f - T_c) \cdot \Delta t \quad (69)$$

Resolvendo a Equação 69 para  $P$  e tomando o limite com  $\Delta t \rightarrow 0$ , resulta:

$$P = m_f \cdot c_f \cdot \frac{dT_f}{dt} + u_f \cdot A_f \cdot (T_f - T_c) \quad (70)$$

No estado estacionário, a potência térmica de referência será  $P_0$  e as temperaturas do combustível e do moderador serão constantes e iguais respectivamente a  $T_{f0}$  e  $T_{c0}$ . Disso e da Equação 70 resulta:

$$P_0 = m_f \cdot c_f \cdot \frac{dT_{f0}}{dt} + u_f \cdot A_f \cdot (T_{f0} - T_{c0}),$$

Como  $\frac{dT_{f0}}{dt} = 0$ , obtém-se

$$u_f \cdot A_f = \frac{P_0}{T_{f0} - T_{c0}} \quad (71)$$

Substituindo a Equação 71 na Equação 70 e resolvendo para  $\frac{dT_f}{dt}$ , vem:

$$\frac{dT_f}{dt} = \frac{P}{m_f \cdot c_f} - \frac{P_0}{m_f \cdot c_f} \cdot \left( \frac{T_f - T_c}{T_{f0} - T_{c0}} \right) \quad (72)$$

Sendo  $T_{ex}$  e  $T_{lp}$  as temperaturas respectivamente na saída e na entrada do núcleo,  $T_c$  é definido como a temperatura média do moderador dada por:

$$T_c = \frac{T_{ex} + T_{lp}}{2} \quad (73)$$

A massa de refrigerante residente no núcleo é  $m_c$ , e como existe um fluxo de injeção  $Q_p$  devido às bombas, somente uma parcela da energia térmica devido à convecção é utilizada para aquecer a massa  $m_c$ , sendo o restante transportado com a massa de refrigerante  $\Delta m_c$  que sai do núcleo a uma temperatura  $T_{ex}$ .

Assim, considerando que a massa de refrigerante  $\Delta m_{lp}$  (que vem do plenum inferior e entra no núcleo a uma temperatura  $T_{lp}$ ) é a mesma que sai do núcleo  $\Delta m_c$  (que sai a uma temperatura  $T_{ex}$ ), podemos escrever a seguinte equação de balanço de energia para um intervalo de tempo  $\Delta t$ :

$$h_f \cdot A_f \cdot (T_f - T_c) \cdot \Delta t = m_c \cdot c_c \cdot \Delta T_c + \Delta m_c \cdot c_c \cdot (T_{ex} - T_{lp}) \quad (74)$$

Da Equação 65 e substituindo a Equação 71 na Equação 74, segue imediatamente que

$$P_0 \cdot \left( \frac{T_f - T_c}{T_{f0} - T_{c0}} \right) = m_c \cdot c_c \cdot \frac{\Delta T_c}{\Delta t} + Q_p \cdot c_c \cdot (T_{ex} - T_{lp})$$

Tomando o limite, com  $\Delta t \rightarrow 0$  encontra-se que

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{P_0}{m_c \cdot c_c} \cdot \left( \frac{T_f - T_c}{T_{f0} - T_{c0}} \right) - \frac{Q_p}{m_c} \cdot (T_{ex} - T_{lp}) \quad (75)$$

Resolvendo a Equação 73 para  $T_{ex}$  e substituindo na Equação 75, obtém-se:

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{P_0}{m_c \cdot c_c} \cdot \left( \frac{T_f - T_c}{T_{f0} - T_{c0}} \right) - \frac{2Q_p}{m_c} \cdot (T_c - T_{lp}) \quad (76)$$

Derivando a Equação 73 em relação ao tempo e resolvendo para  $\frac{dT_{ex}}{dt}$  encontra-se

$$\frac{dT_{ex}}{dt} = 2 \cdot \frac{dT_c}{dt} - \frac{dT_{lp}}{dt} \quad (77)$$

Finalmente, substituindo a Equação 68 e a Equação 76 na Equação 77, vem:

$$\frac{dT_{ex}}{dt} = \frac{2P_0}{m_c \cdot c_c} \cdot \left( \frac{T_f - T_c}{T_{f0} - T_{c0}} \right) - \frac{4Q_p}{m_c} (T_c - T_{lp}) - \frac{Q_p}{m_{lp}} (T_{ip} - T_{lp}) \quad (78)$$

### 3. Plenum superior do vaso de pressão

Durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , a massa de água  $\Delta m_c$  que entra no Plenum superior é igual a que sai  $\Delta m_o$ .

Sendo a vazão média total da bomba dada por  $Q_p = \frac{\Delta m_c}{\Delta t}$ , tem-se:

$$\Delta m_c = Q_p \cdot \Delta t \quad (79)$$

Admitindo uma mistura térmica perfeita entre o fluido residente no plenum com o fluido que entra no plenum, pela equação das trocas de calor, vem:

$$m_o \cdot c \cdot \Delta T_o + \Delta m_c \cdot c \cdot (T_o - T_{ex}) = 0 \quad (80)$$

Donde se obtém:

$$\Delta T_o = \frac{\Delta m_c}{m_o} \cdot (T_{ex} - T_o) \quad (81)$$

Substituindo a Equação 79 na Equação 81, tem-se que  $\frac{\Delta T_o}{\Delta t} = \frac{Q_p}{m_o} \cdot (T_{ex} - T_o)$

Tomando o limite, com  $\Delta t \rightarrow 0$  encontra-se finalmente

$$\frac{dT_o}{dt} = \frac{Q_p}{m_o} \cdot (T_{ex} - T_o) \quad (82)$$

### 4. Primário do Gerador de Vapor

Durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , a massa de refrigerante  $\Delta m_o$  vinda do plenum superior do vaso a uma temperatura  $T_{SG1}$ , segue uma curta trajetória radial e segue em direção a oito bombas primárias, sendo bombeada no sentido descendente e trocando calor a uma taxa  $W$  com o lado primário dos geradores de vapor e trocando calor também com a massa de refrigerante  $m_w$  residente na zona primária do gerador de vapor, resfriando-se e saindo da região a uma temperatura  $T_{SG0}$ . Nesse mesmo intervalo de tempo, a massa  $m_w$  sofre uma variação de temperatura dada por  $\Delta T_p$ .

Sendo a vazão média total da bomba dada por  $Q_p = \frac{\Delta m_o}{\Delta t}$ , tem-se:

$$\Delta m_o = Q_p \cdot \Delta t \quad (83)$$

Admitindo uma mistura térmica perfeita entre o fluido residente na zona primária do gerador de vapor com o fluido que entra na zona primária e pelo balanço de energia, vem:

$$\Delta m_o \cdot c_w \cdot (T_{SG0} - T_{SG1}) + m_w \cdot c_w \cdot \Delta T_p + W \cdot \Delta t = 0 \quad (84)$$

Donde se obtém, por substituição da Equação 83:

$$m_w \cdot c_w \cdot \frac{\Delta T_p}{\Delta t} = Q_p \cdot c_w \cdot (T_{SG1} - T_{SG0}) - W \quad (85)$$

Tomando o limite, com  $\Delta t \rightarrow 0$  encontra-se finalmente

$$m_w c_w \frac{dT_p}{dt} = Q_p c_w (T_{SG1} - T_{SG0}) - W \quad (86)$$

## APÊNDICE B – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MODELO TERMOIDRÁULICO (CIRCUITO SECUNDÁRIO DO GERADOR DE VAPOR)

O gerador de vapor (GV) do modelo representa o comportamento completo dos oito componentes correspondentes, cada um deles constituídos por um feixe de tubos de geometria helicoidal. No circuito secundário dos geradores de vapor, água sub-resfriada é bombeada para dentro desses tubos no sentido ascendente, recebendo o calor do refrigerante que desce em contra fluxo axial no lado primário dos geradores de vapor. Durante o processo de troca de calor, a água no interior dos tubos vai se aquecendo até atingir a temperatura de saturação. Em seguida, ainda na temperatura de saturação, verifica-se a existência de uma região mais acima onde predomina a existência simultânea de líquido e vapor. Um pouco mais adiante, tem-se uma região onde só encontramos vapor a uma temperatura maior que a temperatura de saturação, i.e. vapor superaquecido. Com isso, podemos definir duas fronteiras: a fronteira líquido-vapor e a fronteira vapor-vapor superaquecido. Daí segue a definição das três regiões: sub-resfriada, bifásica e superaquecida e seus comprimentos correspondentes  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$ . Esses comprimentos podem mudar com o passar do tempo devido a algum transitório como um fechamento de válvula de admissão da turbina ou uma diminuição do fluxo de alimentação de água que está sendo bombeada para dentro dos GV. Assim, para simular o secundário dos GV, foi adotado um modelo de fronteiras móveis.

O presente modelo será obtido por meio de equações de balanço de massa e de energia para cada uma das três regiões citadas anteriormente.

### 1. Balanço de massa:

A equação da continuidade é dada por

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (87)$$

em que  $\rho = \rho(x, y, z, t)$  é a densidade do fluido e  $\mathbf{v} = \mathbf{v}(x, y, z, t)$  é a velocidade do fluido.

Assumindo, por simplicidade, que o fluido tem uma velocidade vertical para cima

$$\mathbf{v} = v(z, t)\vec{k} \quad (88)$$

e que o operador nabla em coordenadas cartesianas é dado por

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}\vec{k}, \text{ tem-se:}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left( \frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}\vec{k} \right) \cdot (\rho v \vec{k}) = 0$$

Donde se conclui que

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v) = 0 \quad (89)$$

Sendo A a área da secção reta total do feixe de tubos dos oito geradores de vapor e sabendo que a vazão mássica de fluido correspondente é dada por  $\dot{m} = \rho v A$ , pode-se escrever:

$$\rho v = \frac{\dot{m}}{A} \quad (90)$$

Substituindo a Equação 90 na Equação 89 e como A é constante, a equação de balanço de massa geral para o modelo é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(A\rho) + \frac{\partial}{\partial z}(\dot{m}) = 0 \quad (91)$$

### Balanço de Energia:

A equação para o balanço de energia em um fluido é dada pela 1ª lei da Termodinâmica para um volume de controle (V.C.), cuja expressão é dada por:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \oint_{S.C.} \left( \frac{v^2}{2} + gz + h \right) (\rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A}) + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C.} (e\rho) dV \quad (92)$$

Da Equação 88 e sendo  $\mathbf{n}$  o versor normal à superfície de controle (S.C.) apontando para fora dela, pode-se re-escrever a equação anterior assim:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \oint_{s.c.} \left( \frac{v^2}{2} + gz + h \right) (\rho v \vec{k} \cdot \vec{n}) dA + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{v.c.} (e \rho) dV$$

Tendo  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{n}$  sentidos opostos, aplicando o Teorema da Divergência<sup>14</sup> à primeira integral, obtém-se:

$$\dot{Q} - \dot{W} = - \iiint \vec{\nabla} \cdot \left[ \left( \frac{v^2}{2} + gz + h \right) (\rho v \vec{k}) \right] dV + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{v.c.} (e \rho) dV$$

Donde se conclui que

$$\dot{Q} - \dot{W} = - \iint_R \left[ \int \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v^2}{2} + gz + h \right) (\rho v) dz \right] dA + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{v.c.} (e \rho) dV$$

Portanto, tem-se:

$$\dot{Q} - \dot{W} = - \int \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v^2}{2} + gz + h \right) (\rho A v) dz + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{v.c.} (e \rho) dV \quad (93)$$

A última integral é a energia total armazenada no volume de controle  $E_{v.c.}$ .

Assumindo que as energias cinética específica e potencial gravitacional específica do fluido são desprezíveis em comparação com as outras formas de energia envolvidas, a Equação 93 será re-escrita assim:

$$\dot{Q} - \dot{W} = - \int \frac{\partial}{\partial z} (h \rho A v) dz + \frac{\partial E_{v.c.}}{\partial t} \quad (94)$$

Lembrando da equação  $\dot{m} = \rho v A$ , tem-se:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \int \frac{\partial}{\partial z} (\dot{m} h) dz = \frac{\partial E_{v.c.}}{\partial t} \quad (95)$$

Assumindo que o escoamento é unidimensional e permanente em cada região estudada, pode-se introduzir a seguinte simplificação:

$$\frac{\partial E_{v.c.}}{\partial t} = 0$$

A Equação 95 agora será dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (Q - W) + \int \frac{\partial}{\partial z} (\dot{m} h) dz = 0 \quad (96)$$

<sup>14</sup> Teorema da Divergência:  $\oint \vec{F} \cdot d\vec{A} = \iiint \vec{\nabla} \cdot \vec{F} dV$

Da termodinâmica, a variação da energia interna é dada por:

$$U = Q - W \quad (97)$$

Por outro lado, sabe-se da termodinâmica que U está relacionada com a entalpia específica h, a pressão p e o volume V pela relação:

$$U = mh - pV \quad (98)$$

onde m é a massa do fluido.

Derivando as equações 97 e 98 em relação ao tempo e combinando os resultados, tem-se:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(Q - W) = \frac{\partial}{\partial t}(mh - pV) \quad (99)$$

sendo  $V = Az$  e  $m = \rho Az$  fica-se com:

$$\frac{\partial}{\partial t}(Q - W) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho Azh - pAz) \quad (100)$$

Derivando a Equação 100 em relação a z e aplicando o teorema de Schwarz<sup>15</sup>, para um escoamento permanente fica:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\partial}{\partial t}(Q - W) \right] = \frac{\partial}{\partial t}(\rho Ah - pA) \quad (101)$$

Integrando a Equação 101 em relação a z, fica:

$$\frac{\partial}{\partial t}(Q - W) = \int \frac{\partial}{\partial t}(\rho Ah - pA) dz \quad (102)$$

Substituindo a Equação 102 na Equação 96, tem-se finalmente a equação de balanço de energia geral para o modelo:

$$\int \frac{\partial}{\partial t}(\rho Ah - pA) dz + \int \frac{\partial}{\partial z}(\dot{m}h) dz = 0 \quad (103)$$

---

15 Teorema de Schwarz:  $\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}$

A seguir, segue a aplicação das equações de balanço de massa e energia encontradas a cada uma das regiões definidas.

## 2. Região sub-resfriada

### Balanço de massa:

Integrando a Equação 91 em relação a  $z$ , com  $z$  variando de 0 a  $L_1$ , vem:

$$\int_0^{L_1} \frac{\partial}{\partial t} (A\rho) dz + \int_0^{L_1} \frac{\partial}{\partial z} (\dot{m}) dz = 0 \quad (104)$$

Aplicando a regra de Leibnitz<sup>16</sup> à primeira integral e integrando a segunda, tem-se:

$$\frac{d}{dt} \int_0^{L_1} (A\rho) dz - A\rho(L_1) \frac{dL_1}{dt} + A\rho(0) \frac{d0}{dt} + \dot{m}(L_1) - \dot{m}(0) = 0$$

Como  $A$  é constante, e definindo  $\dot{m}(L_1) \equiv \dot{m}_{12}$  e  $\dot{m}(0) \equiv \dot{m}_{in}$  tem-se finalmente

$$A \frac{d}{dt} \int_0^{L_1} \rho dz - A\rho(L_1) \frac{dL_1}{dt} + \dot{m}_{12} - \dot{m}_{in} = 0 \quad (105)$$

### Balanço de energia:

Para a região sub-resfriada a Equação 103 torna-se:

$$\int_0^{L_1} \frac{\partial}{\partial t} (\rho Ah - pA) dz + \int_0^{L_1} \frac{\partial}{\partial z} (\dot{m} h) dz = 0 \quad (106)$$

A primeira integral da Equação 106 pode ser separada em duas e a segunda integral pode ser resolvida, dando

$$\int_0^{L_1} \frac{\partial}{\partial t} (\rho Ah) dz - \int_0^{L_1} \frac{\partial}{\partial t} (pA) dz + \dot{m}(L_1) h(L_1) - \dot{m}(0) h(0) = 0$$

---

16 Regra de Leibnitz:  $\int_{a(t)}^{b(t)} \frac{\partial f}{\partial t} dx = \frac{d}{dt} \int_{a(t)}^{b(t)} f(x, t) dx - f(b(t), t) \cdot b'(t) + f(a(t), t) \cdot a'(t)$

Aplicando a regra de Leibnitz às duas primeiras integrais e definindo  $h(L_1) \equiv h_l$  e  $h(0) \equiv h_{in}$  fica-se com

$$A \frac{d}{dt} \int_0^{L_1} (\rho h) dz - A \rho(L_1) h_l \frac{dL_1}{dt} + A \rho(0) h_{in} \frac{d0}{dt} - A \frac{d}{dt} \int_0^{L_1} p dz + p(L_1) A \frac{dL_1}{dt} - p(0) A \frac{d0}{dt} + \dot{m}_{12} h_l - \dot{m}_{in} h_{in} = 0$$

De onde resulta:

$$A \frac{d}{dt} \int_0^{L_1} (\rho h) dz - A \rho(L_1) h_l \frac{dL_1}{dt} - \underbrace{\frac{d}{dt} \int_0^{L_1} p dV}_{W_1} + A \cdot p(L_1) \frac{dL_1}{dt} + \dot{m}_{12} h_l - \dot{m}_{in} h_{in} = 0 \quad (107)$$

Por outro lado, admita que o produto  $p(L_1) \cdot A \cdot L_1$  é uma constante.

Derivando a expressão anterior em relação ao tempo, obtém-se:

$$\frac{d}{dt} [p(L_1) \cdot A \cdot L_1] = A \cdot p(L_1) \frac{dL_1}{dt} + A \cdot L_1 \frac{dp}{dt} = 0$$

De onde se conclui que

$$A \cdot p(L_1) \cdot \frac{dL_1}{dt} = -A \cdot L_1 \cdot \frac{dp}{dt} \quad (108)$$

Substituindo a Equação 108 na Equação 107, finalmente encontra-se:

$$A \frac{d}{dt} \int_0^{L_1} (\rho h) dz - A \rho(L_1) h_l \frac{dL_1}{dt} - A L_1 \frac{dp}{dt} + \dot{m}_{12} h_l - \dot{m}_{in} h_{in} = W_1 \quad (109)$$

### 3. Região bifásica

#### Balço de massa:

Integrando a Equação 91 em relação a  $z$ , com  $z$  variando de  $L_1$  a  $L_1 + L_2$ , vem:

$$\int_{L_1}^{L_1+L_2} \frac{\partial}{\partial t} (A \rho) dz + \int_{L_1}^{L_1+L_2} \frac{\partial}{\partial z} (\dot{m}) dz = 0 \quad (110)$$

Aplicando a regra de Leibnitz à primeira integral e integrando a segunda, tem-se:

$$\frac{d}{dt} \int_{L_1}^{L_1+L_2} (A\rho) dz - A\rho(L_1+L_2) \frac{d}{dt}(L_1+L_2) + A\rho(L_1) \frac{dL_1}{dt} + \dot{m}(L_1+L_2) - \dot{m}(L_1) = 0$$

Como  $A$  é constante, e definindo  $\dot{m}(L_1+L_2) \equiv \dot{m}_{23}$  fica-se finalmente com

$$A \left\{ \frac{d}{dt} \int_{L_1}^{L_1+L_2} \rho dz + \rho(L_1) \frac{dL_1}{dt} - \rho(L_1+L_2) \frac{d(L_1+L_2)}{dt} \right\} = \dot{m}_{12} - \dot{m}_{23} \quad (111)$$

### Balço de energia:

Para a região bifásica a Equação 103 torna-se:

$$\int_{L_1}^{L_1+L_2} \frac{\partial}{\partial t} (\rho Ah - pA) dz + \int_{L_1}^{L_1+L_2} \frac{\partial}{\partial z} (\dot{m} h) dz = 0 \quad (112)$$

A primeira integral da Equação 112 pode ser separada em duas e a segunda integral pode ser resolvida, dando

$$\int_{L_1}^{L_1+L_2} \frac{\partial}{\partial t} (\rho Ah) dz - \int_{L_1}^{L_1+L_2} \frac{\partial}{\partial t} (pA) dz + \dot{m}(L_1+L_2) h(L_1+L_2) - \dot{m}(L_1) h(L_1) = 0$$

Aplicando a regra de Leibnitz às duas primeiras integrais e definindo  $h(L_1+L_2) \equiv h_v$  fica-se com:

$$A \frac{d}{dt} \int_{L_1}^{L_1+L_2} (\rho h) dz - A \cdot \rho(L_1+L_2) \cdot h_v \frac{d(L_1+L_2)}{dt} + A \cdot \rho(L_1) \cdot h_l \frac{dL_1}{dt} - \underbrace{\frac{d}{dt} \int_{L_1}^{L_1+L_2} p dV}_{W_2} + A \cdot p(L_1+L_2) \cdot \frac{d(L_1+L_2)}{dt} - A \cdot p(L_1) \frac{dL_1}{dt} + \dot{m}_{23} \cdot h_v - \dot{m}_{12} \cdot h_l = 0$$

De onde resulta:

$$A \frac{d}{dt} \int_{L_1}^{L_1+L_2} (\rho h) dz - A \cdot \rho(L_1+L_2) \cdot h_v \cdot \frac{d(L_1+L_2)}{dt} + A \cdot \rho(L_1) \cdot h_l \cdot \frac{dL_1}{dt} + A \cdot p(L_1+L_2) \cdot \frac{d(L_1+L_2)}{dt} - A \cdot p(L_1) \cdot \frac{dL_1}{dt} + \dot{m}_{23} \cdot h_v - \dot{m}_{12} \cdot h_l = W_2 \quad (113)$$

Por outro lado, admita que o produto  $p(L_1+L_2) \cdot A \cdot (L_1+L_2)$  é uma constante.

Derivando a expressão anterior em relação ao tempo, obtém-se:

$$\frac{d}{dt}[p(L_1+L_2) \cdot A \cdot (L_1+L_2)] = A \cdot p(L_1+L_2) \frac{d(L_1+L_2)}{dt} + A \cdot (L_1+L_2) \cdot \frac{dp}{dt} = 0$$

De onde se conclui que

$$A \cdot p(L_1+L_2) \cdot \frac{d(L_1+L_2)}{dt} = -A \cdot (L_1+L_2) \cdot \frac{dp}{dt} \quad (114)$$

Substituindo a Equação 108 e a Equação 114 na Equação 113, finalmente encontra-se:

$$\begin{aligned} A \frac{d}{dt} \int_{L_1}^{L_1+L_2} (\rho h) dz - A \cdot \rho(L_1+L_2) \cdot h_v \cdot \frac{d(L_1+L_2)}{dt} + A \cdot \rho(L_1) \cdot h_l \cdot \frac{dL_1}{dt} + \\ - A \cdot L_2 \cdot \frac{dp}{dt} + \dot{m}_{23} \cdot h_v - \dot{m}_{12} \cdot h_l = W_2 \end{aligned} \quad (115)$$

#### 4. Região superaquecida

##### Balço de massa:

Integrando a Equação 91 em relação a  $z$ , com  $z$  variando de  $L_1+L_2$  a  $L=L_1+L_2+L_3 = \text{constante}$ , vem:

$$\int_{L_1+L_2}^L \frac{\partial}{\partial t} (A\rho) dz + \int_{L_1+L_2}^L \frac{\partial}{\partial z} (\dot{m}) dz = 0 \quad (116)$$

Aplicando a regra de Leibnitz à primeira integral e integrando a segunda, tem-se:

$$\frac{d}{dt} \int_{L_1+L_2}^L (A\rho) dz + A \cdot \rho(L_1+L_2) \frac{d(L_1+L_2)}{dt} + \dot{m}(L) - \dot{m}(L_1+L_2) = 0$$

Como  $A$  é constante, e definindo  $\dot{m}(L) \equiv \dot{m}_{out}$  fica-se finalmente com

$$A \left\{ \frac{d}{dt} \int_{L_1+L_2}^L \rho dz + \rho(L_1+L_2) \frac{d(L_1+L_2)}{dt} \right\} = \dot{m}_{23} - \dot{m}_{out} \quad (117)$$

**Balço de energia:**

Para a região superaquecida a Equação 103 torna-se:

$$\int_{L_1+L_2}^L \frac{\partial}{\partial t}(\rho Ah - pA) dz + \int_{L_1+L_2}^L \frac{\partial}{\partial z}(\dot{m}h) dz = 0 \quad (118)$$

A primeira integral da Equação 118 pode ser separada em duas e a segunda integral pode ser resolvida, dando

$$\int_{L_1+L_2}^L \frac{\partial}{\partial t}(\rho Ah) dz - \int_{L_1+L_2}^L \frac{\partial}{\partial t}(pA) dz + \dot{m}(L)h(L) - \dot{m}(L_1+L_2)h(L_1+L_2) = 0$$

Aplicando a regra de Leibnitz às duas primeiras integrais e definindo  $h(L) \equiv h_{out}$  fica-se com:

$$\begin{aligned} A \cdot \frac{d}{dt} \int_{L_1+L_2}^L (\rho h) dz + A \cdot \rho(L_1+L_2) \cdot h_v \frac{d(L_1+L_2)}{dt} - A \cdot \rho(L) \cdot h_{out} \frac{dL}{dt} - \underbrace{\frac{d}{dt} \int_{L_1+L_2}^L p dV}_{W_3} + \\ + A \cdot p(L) \cdot \frac{dL}{dt} - A \cdot p(L_1+L_2) \frac{d(L_1+L_2)}{dt} + \dot{m}_{out} h_{out} - \dot{m}_{23} h_v = 0 \end{aligned}$$

De onde resulta:

$$\begin{aligned} A \cdot \frac{d}{dt} \int_{L_1+L_2}^L (\rho h) dz + A \cdot \rho(L_1+L_2) \cdot h_v \frac{d(L_1+L_2)}{dt} - A \cdot p(L_1+L_2) \frac{d(L_1+L_2)}{dt} + \\ + \dot{m}_{out} h_{out} - \dot{m}_{23} h_v = W_3 \end{aligned} \quad (119)$$

Por outro lado, admita que o produto  $p(L) \cdot A \cdot L$  é uma constante.

Derivando a expressão anterior em relação ao tempo, obtém-se:

$$\frac{d}{dt}[p(L) \cdot A \cdot L] = A \cdot p(L) \frac{dL}{dt} + A \cdot L \cdot \frac{dp}{dt} = 0$$

De onde se conclui que

$$A \cdot (L_1+L_2) \cdot \frac{dp}{dt} = -A \cdot L_3 \cdot \frac{dp}{dt} \quad (120)$$

Substituindo a Equação 114 na Equação 120 resulta

$$A \cdot \rho(L_1 + L_2) \cdot \frac{d(L_1 + L_2)}{dt} = A \cdot L_3 \cdot \frac{dp}{dt} \quad (121)$$

Substituindo a Equação 121 na Equação 119, finalmente encontra-se:

$$A \frac{d}{dt} \int_{L_1+L_2}^L (\rho h) dz + A \cdot \rho(L_1 + L_2) \cdot h_v \frac{d(L_1 + L_2)}{dt} - A \cdot L_3 \frac{dp}{dt} + \quad (122)$$

$$+ \dot{m}_{out} h_{out} - \dot{m}_{23} h_v = W_3$$

## APÊNDICE C – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MODELO TERMOIDRÁULICO (CIRCUITO SECUNDÁRIO DO GERADOR DE VAPOR – MODIFICADO)

Para a implementação do modelo do circuito secundário do gerador de vapor no SIMULINK/MATLAB, as equações de balanço de massa e de energia para as três regiões do SG, deduzidas no Apêndice B, foram rearranjadas com relação às variáveis de estado  $p$ ,  $T_{out}$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ , e  $L_3$ . A seguir, a dedução das equações modificadas do modelo para cada uma das regiões será apresentada. Assumiu-se que a entalpia específica e a densidade da água são funções da temperatura e da pressão, ou seja  $h=h(T, p)$  e  $\rho=\rho(T, p)$ .

### 1. Região sub-resfriada

#### Balanço de massa:

A Equação 105 é dada pela expressão

$$A \frac{d}{dt} \int_0^{L_1} \rho dz - A \rho(L_1) \frac{dL_1}{dt} + \dot{m}_{12} - \dot{m}_{in} = 0$$

Aplicando o teorema do valor médio para integrais à integral acima, vem:

$$\bar{\rho} L_1 = \int_0^{L_1} \rho dz \quad (123)$$

Substituindo a Equação 123 na Equação 105 e resolvendo a derivada, fica:

$$A[\bar{\rho} - \rho(L_1)] \frac{dL_1}{dt} + A L_1 \frac{d\bar{\rho}}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{12} \quad (124)$$

Definindo a densidade média como sendo a densidade calculada na temperatura média da região,  $\bar{\rho} \equiv \rho(T_1, p)$  obtém-se:

$$A[\rho(T_1, p) - \rho(L_1)] \frac{dL_1}{dt} + A L_1 \frac{d\rho(T_1, p)}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{12} \quad (125)$$

Para a derivada que aparece no segundo termo do primeiro membro da Equação 125, tem-se:

$$\frac{d\rho(T_1, p)}{dt} = \frac{\partial\rho(T_1, p)}{\partial T_1} \frac{dT_1}{dt} + \frac{\partial\rho(T_1, p)}{\partial p} \frac{dp}{dt} \quad (126)$$

Da Equação 23, pode-se re-escrever a Equação 126 assim:

$$\frac{d\rho(T_1, p)}{dt} = \frac{1}{2} \frac{\partial\rho(T_1, p)}{\partial T_1} \frac{dT_{in}}{dt} + \frac{1}{2} \frac{\partial\rho(T_1, p)}{\partial T_1} \frac{dT_{sat}}{dt} + \frac{\partial\rho(T_1, p)}{\partial p} \frac{dp}{dt} \quad (127)$$

Substituindo a Equação 127 na Equação 125, definindo  $\rho(L_1) \equiv \rho(T_{sat}, p) \equiv \rho_l$  e reorganizando os termos, fica:

$$\begin{aligned} & A[\rho(T_1, p) - \rho_l] \frac{dL_1}{dt} + L_1 A \left[ \frac{1}{2} \frac{\partial\rho(T_1, p)}{\partial T_1} \frac{dT_{in}}{dt} \right] + \\ & + L_1 A \left[ \frac{1}{2} \frac{\partial\rho(T_1, p)}{\partial T_1} \frac{dT_{sat}}{dt} \right] + L_1 A \left[ \frac{\partial\rho(T_1, p)}{\partial p} \frac{dp}{dt} \right] = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{12} \end{aligned} \quad (128)$$

Fazendo  $\frac{dT_{sat}}{dt} = \frac{dT_{sat}}{dp} \frac{dp}{dt}$  na Equação 128 e reorganizando os termos em relação às derivadas temporais, obtém-se:

$$\begin{aligned} & A[\rho(T_1, p) - \rho_l] \frac{dL_1}{dt} + L_1 A \left[ \frac{\partial\rho(T_1, p)}{\partial p} + \frac{1}{2} \frac{\partial\rho(T_1, p)}{\partial T_1} \frac{dT_{sat}}{dp} \right] \frac{dp}{dt} + \\ & + L_1 A \left[ \frac{1}{2} \frac{\partial\rho(T_1, p)}{\partial T_1} \right] \frac{dT_{in}}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{12} \end{aligned} \quad (129)$$

Daí resulta a Equação 25.

Balanco de energia:

A Equação 109 é dada pela expressão

$$A \frac{d}{dt} \int_0^{L_1} (\rho h) dz - A \rho(L_1) h_l \frac{dL_1}{dt} - A L_1 \frac{dp}{dt} + \dot{m}_{12} h_l - \dot{m}_{in} h_{in} = W_1$$

Considerando  $\rho \approx \bar{\rho} = \text{constante}$  e aplicando o teorema do valor médio para integrais, vem:

$$\bar{\rho} \bar{h} L_1 = \int_0^{L_1} \rho h dz \quad (130)$$

Definindo  $\bar{h} \equiv h(T_1, p)$  e sendo  $\bar{\rho} \equiv \rho(T_1, p)$ , pode-se re-escrever a Equação 109 assim:

$$\begin{aligned} & A \frac{d\rho(T_1, p)}{dt} h(T_1, p) L_1 + A \rho(T_1, p) \frac{dh(T_1, p)}{dt} L_1 + \\ & + A \rho(T_1, p) h(T_1, p) \frac{dL_1}{dt} - A \rho_l h_l \frac{dL_1}{dt} - A L_1 \frac{dp}{dt} = \dot{m}_{in} h_{in} - \dot{m}_{12} h_l + W_1 \end{aligned} \quad (131)$$

Substituindo a derivada que comparece no primeiro termo do primeiro membro da Equação 131, pela Equação 127, vem:

$$\begin{aligned} & A h(T_1, p) L_1 \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial \rho(T_1, p)}{\partial T_1} \frac{dT_{in}}{dt} + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho(T_1, p)}{\partial T_1} \frac{dT_{sat}}{dt} + \frac{\partial \rho(T_1, p)}{\partial p} \frac{dp}{dt} \right\} + \\ & + A \rho(T_1, p) \frac{dh(T_1, p)}{dt} L_1 + A [\rho(T_1, p) h(T_1, p) - \rho_l h_l] \frac{dL_1}{dt} - \\ & - A L_1 \frac{dp}{dt} = \dot{m}_{in} h_{in} - \dot{m}_{12} h_l + W_1 \end{aligned} \quad (132)$$

Fazendo  $\frac{dT_{sat}}{dt} = \frac{dT_{sat}}{dp} \frac{dp}{dt}$  e  $\frac{dh(T_1, p)}{dt} = \frac{dh(T_1, p)}{dp} \frac{dp}{dt}$  na Equação 128 e reorganizando os termos em relação às derivadas temporais, obtém-se:

$$\begin{aligned} & A [h(T_1, p) \rho(T_1, p) - h_l \rho_l] \frac{dL_1}{dt} + \\ & + L_1 A \left\{ h(T_1, p) \left[ \frac{\partial \rho(T_1, p)}{\partial p} + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho(T_1, p)}{\partial T_1} \frac{dT_{sat}}{dp} \right] + \rho(T_1, p) \frac{\partial h(T_1, p)}{\partial p} - 1 \right\} \frac{dp}{dt} \\ & + L_1 A \left\{ \frac{1}{2} h(T_1, p) \frac{\partial \rho(T_1, p)}{\partial T_1} \right\} \frac{dT_{in}}{dt} = \dot{m}_{in} h_{in} - \dot{m}_{12} h_l + W_1 \end{aligned} \quad (133)$$

Daí resulta a Equação 26.

## 2. Região bifásica

### Balço de massa:

A Equação 111 é dada pela expressão

$$A \left\{ \frac{d}{dt} \int_{L_1}^{L_1+L_2} \rho dz + \rho(L_1) \frac{dL_1}{dt} - \rho(L_1+L_2) \frac{d(L_1+L_2)}{dt} \right\} = \dot{m}_{12} - \dot{m}_{23}$$

Aplicando o teorema do valor médio para integrais à integral acima, vem:

$$\bar{\rho} L_2 = \int_{L_1}^{L_1+L_2} \rho dz \quad (134)$$

Substituindo a Equação 134 na Equação 111, resolvendo a derivada e reorganizando os termos, vem:

$$A[\rho(L_1) - \rho(L_1+L_2)] \frac{dL_1}{dt} + A[\bar{\rho} - \rho(L_1+L_2)] \frac{dL_2}{dt} + A L_2 \frac{d\bar{\rho}}{dt} = \dot{m}_{12} - \dot{m}_{23} \quad (135)$$

Na região bifásica, a densidade é dada por:

$$\rho = \rho_v + (\rho_l - \rho_v)(1 - \chi) \quad (136)$$

em que  $\rho_v$ ,  $\rho_l$  e  $\chi$  são respectivamente a densidade do vapor saturado, a densidade do líquido saturado e a fração de vazio.

Calculando o valor médio da densidade no intervalo de  $L_1$  a  $L_1+L_2$  encontra-se:

$$\bar{\rho} = \rho_v + (\rho_l - \rho_v)(1 - \bar{\chi}) \quad (137)$$

Definindo a densidade  $\rho(L_1+L_2) \equiv \rho_v$  e substituindo a Equação 137 na Equação 135, tem-se:

$$\begin{aligned} & A[\rho_l - \rho_v] \frac{dL_1}{dt} + A[(\rho_l - \rho_v)(1 - \bar{\chi})] \frac{dL_2}{dt} + \\ & + A L_2 \frac{d}{dt} [\rho_v + (\rho_l - \rho_v)(1 - \bar{\chi})] = \dot{m}_{12} - \dot{m}_{23} \end{aligned} \quad (138)$$

Resolvendo as derivadas totais, reorganizando os termos, e notando que para o líquido e o vapor saturados tem-se  $\frac{dT}{dt} = 0$ , vem:

$$A(\rho_l - \rho_v) \frac{dL_1}{dt} + A[(\rho_l - \rho_v)(1 - \bar{\chi})] \frac{dL_2}{dt} + \\ + L_2 A \left[ \frac{\partial \rho_v}{\partial p} \bar{\chi} + \frac{\partial \rho_l}{\partial p} (1 - \bar{\chi}) \right] \frac{dp}{dt} = \dot{m}_{12} - \dot{m}_{23} \quad (139)$$

Daí resulta a Equação 27.

### 3. Balanço de energia:

A Equação 115 é dada pela expressão

$$A \frac{d}{dt} \int_{L_1}^{L_1+L_2} (\rho h) dz - A \cdot \rho (L_1 + L_2) \cdot h_v \cdot \frac{d(L_1 + L_2)}{dt} + A \cdot \rho (L_1) \cdot h_l \cdot \frac{dL_1}{dt} + \\ - A \cdot L_2 \cdot \frac{dp}{dt} + \dot{m}_{23} \cdot h_v - \dot{m}_{12} \cdot h_l = W_2$$

Considerando  $\rho \approx \bar{\rho} = \text{constante}$  e aplicando o teorema do valor médio para integrais, vem:

$$\bar{\rho} \bar{h} L_2 = \int_{L_1}^{L_1+L_2} \rho h dz \quad (140)$$

Na região bifásica, pode-se re-escrever a densidade dada pela Equação 136 do seguinte modo:

$$\rho = \rho_l(1 - \chi) + \rho_v \chi \quad (141)$$

De onde se conclui que

$$\bar{\rho} = \rho_l(1 - \bar{\chi}) + \rho_v \bar{\chi} \quad (142)$$

Substituindo a Equação 142 na Equação 140, e a Equação 140 na Equação 115, fica:

$$\begin{aligned}
& A \left\{ L_2 \bar{h} \frac{d\bar{\rho}}{dt} + L_2 \bar{\rho} \frac{d\bar{h}}{dt} + \bar{\rho} \bar{h} \frac{dL_2}{dt} \right\} - A \rho_v h_v \frac{d(L_1 + L_2)}{dt} + A \rho_l h_l \frac{dL_1}{dt} + \\
& - A L_2 \frac{dp}{dt} = \dot{m}_{12} h_l - \dot{m}_{23} h_v + W_2
\end{aligned} \tag{143}$$

Sendo

$$\bar{h} \equiv h(L_1 + L_2) \equiv h_v$$

$$\frac{d\bar{\rho}}{dt} = \left( \frac{\partial \rho_l}{\partial T} \frac{dT}{dt} + \frac{\partial \rho_l}{\partial p} \frac{dp}{dt} \right) (1 - \bar{\chi}) + \left( \frac{\partial \rho_v}{\partial T} \frac{dT}{dt} + \frac{\partial \rho_v}{\partial p} \frac{dp}{dt} \right) \bar{\chi} = \left( \frac{\partial \rho_l}{\partial p} (1 - \bar{\chi}) + \frac{\partial \rho_v}{\partial p} \bar{\chi} \right) \frac{dp}{dt}$$

$$\frac{d\bar{h}}{dt} = \left( \frac{\partial h_v}{\partial T} \frac{dT}{dt} + \frac{\partial h_v}{\partial p} \frac{dp}{dt} \right) = \frac{\partial h_v}{\partial p} \frac{dp}{dt}$$

pois na região bifásica,  $\frac{dT}{dt} = 0$ , tem-se:

$$\begin{aligned}
& A \left\{ L_2 h_v \left( \frac{\partial \rho_l}{\partial p} (1 - \bar{\chi}) + \frac{\partial \rho_v}{\partial p} \bar{\chi} \right) + L_2 [\rho_l (1 - \bar{\chi}) + \rho_v \bar{\chi}] \frac{\partial h_v}{\partial p} \right\} \frac{dp}{dt} + \\
& + A [\rho_l (1 - \bar{\chi}) + \rho_v \bar{\chi}] h_v \frac{dL_2}{dt} - A \rho_v h_v \frac{d(L_1 + L_2)}{dt} + \\
& + A \rho_l h_l \frac{dL_1}{dt} - A L_2 \frac{dp}{dt} = \dot{m}_{12} h_l - \dot{m}_{23} h_v + W_2
\end{aligned} \tag{144}$$

Reagrupando os termos em relação às derivadas temporais, tem-se:

$$\begin{aligned}
& A (\rho_l h_l - \rho_v h_v) \frac{dL_1}{dt} + A \{ (1 - \bar{\chi}) (h_v \rho_l - h_v \rho_v) \} \frac{dL_2}{dt} + \\
& + L_2 A \left\{ \left( h_v \frac{\partial \rho_v}{\partial p} + \rho_v \frac{\partial h_v}{\partial p} \right) \bar{\chi} + \left( h_v \frac{\partial \rho_l}{\partial p} + \rho_l \frac{\partial h_v}{\partial p} \right) (1 - \bar{\chi}) - 1 \right\} \times \\
& \times \frac{dp}{dt} = W_2 + \dot{m}_{12} h_l - \dot{m}_{23} h_v
\end{aligned} \tag{145}$$

Da Equação 145, segue a Equação 28.

#### 4. Região superaquecida

##### Balço de massa:

A Equação 117 é dada pela expressão

$$A \left\{ \frac{d}{dt} \int_{L_1+L_2}^L \rho dz + \rho(L_1+L_2) \frac{d(L_1+L_2)}{dt} \right\} = \dot{m}_{23} - \dot{m}_{out}$$

Aplicando o teorema do valor médio para integrais à integral acima, vem:

$$\bar{\rho}(L - L_1 - L_2) = \int_{L_1+L_2}^L \rho dz \quad (146)$$

Defina a densidade média da região como sendo a densidade calculada na temperatura média da região:  $\bar{\rho} \equiv \rho(T_3, p)$

Substituindo a Equação 146 na Equação 117, resolvendo a derivada e reorganizando os termos, vem:

$$\begin{aligned} A(L - L_1 - L_2) \frac{d\rho(T_3, p)}{dt} + A\rho(T_3, p) \frac{dL}{dt} - A\rho(T_3, p) \frac{dL_1}{dt} - A\rho(T_3, p) \frac{dL_2}{dt} + \\ A\rho_v \frac{dL_1}{dt} + A\rho_v \frac{dL_2}{dt} = \dot{m}_{23} - \dot{m}_{out} \end{aligned} \quad (147)$$

Como  $L = \text{constante}$ , então  $\frac{dL}{dt} = 0$  e podemos re-escrever a Equação 147 assim:

$$\begin{aligned} A(L - L_1 - L_2) \left[ \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial T_3} \frac{dT_3}{dt} + \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial p} \frac{dp}{dt} \right] + A(\rho_v - \rho(T_3, p)) \frac{dL_1}{dt} + \\ + A(\rho_v - \rho(T_3, p)) \frac{dL_2}{dt} = \dot{m}_{23} - \dot{m}_{out} \end{aligned} \quad (148)$$

Da Equação 24 e fazendo  $\frac{dT_{sat}}{dt} = \frac{dT_{sat}}{dp} \frac{dp}{dt}$  e reorganizando os termos em relação às derivadas temporais encontra-se:

$$\begin{aligned}
& A(\rho_v - \rho(T_3, p)) \frac{dL_1}{dt} + A(\rho_v - \rho(T_3, p)) \frac{dL_2}{dt} + \\
& + (L - L_1 - L_2) A \left[ \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial p} + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial T_3} \frac{dT_{sat}}{dp} \right] \frac{dp}{dt} + \\
& + (L - L_1 - L_2) A \left( \frac{1}{2} \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial T_3} \right) \frac{dT_{out}}{dt} = \dot{m}_{23} - \dot{m}_{out}
\end{aligned} \tag{149}$$

Da Equação 149 segue a Equação 29.

### Balço de energia:

A Equação 122 é dada pela expresso

$$\begin{aligned}
& A \frac{d}{dt} \int_{L_1+L_2}^L (\rho h) dz + A \cdot \rho(L_1+L_2) \cdot h_v \frac{d(L_1+L_2)}{dt} - A \cdot L_3 \frac{dp}{dt} + \\
& + \dot{m}_{out} h_{out} - \dot{m}_{23} h_v = W_3
\end{aligned}$$

Considerando  $\rho \approx \bar{\rho} = \text{constante}$  e aplicando o teorema do valor m\u00e9dio para integrais, vem:

$$\bar{\rho} \bar{h} (L - L_1 - L_2) = \int_{L_1+L_2}^L \rho h dz \tag{150}$$

Definindo  $\bar{h} \equiv h(T_3, p)$  e sendo  $\bar{\rho} \equiv \rho(T_3, p)$ , substituindo a Equa\u00e7\u00e3o 150 na Equa\u00e7\u00e3o 122 e resolvendo a derivada, fica:

$$\begin{aligned}
& A h(T_3, p) (L - L_1 - L_2) \frac{d\rho(T_3, p)}{dt} + A \rho(T_3, p) (L - L_1 - L_2) \frac{dh(T_3, p)}{dt} + \\
& + A \rho(T_3, p) h(T_3, p) \left( -\frac{dL_1}{dt} - \frac{dL_2}{dt} + \frac{dL}{dt} \right) + A \rho_v h_v \frac{dL_1}{dt} + A \rho_v h_v \frac{dL_2}{dt} - \\
& - A (L - L_1 - L_2) \frac{dp}{dt} = \dot{m}_{23} h_v - \dot{m}_{out} h_{out} + W_3
\end{aligned} \tag{151}$$

Como  $L = \text{constante}$ , então  $\frac{dL}{dt} = 0$  e pode-se re-escrever a Equação 151 assim:

$$\begin{aligned}
 & Ah(T_3, p)(L - L_1 - L_2) \left[ \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial T_3} \frac{dT_3}{dt} + \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial p} \frac{dp}{dt} \right] + \\
 & + A\rho(T_3, p)(L - L_1 - L_2) \left[ \frac{\partial h(T_3, p)}{\partial T_3} \frac{dT_3}{dt} + \frac{\partial h(T_3, p)}{\partial p} \frac{dp}{dt} \right] + \\
 & + A(\rho_v h_v - \rho(T_3, p)h(T_3, p)) \frac{dL_1}{dt} + A(\rho_v h_v - \rho(T_3, p)h(T_3, p)) \frac{dL_2}{dt} - \\
 & - A(L - L_1 - L_2) \frac{dp}{dt} = \dot{m}_{23} h_v - \dot{m}_{out} h_{out} + W_3
 \end{aligned} \tag{152}$$

Da Equação 24 e fazendo  $\frac{dT_{sat}}{dt} = \frac{dT_{sat}}{dp} \frac{dp}{dt}$  e reorganizando os termos em relação

às derivadas temporais encontra-se:

$$\begin{aligned}
 & A(\rho_v h_v - \rho(T_3, p)h(T_3, p)) \frac{dL_1}{dt} + A(\rho_v h_v - \rho(T_3, p)h(T_3, p)) \frac{dL_2}{dt} + (L - L_1 - L_2) A \times \\
 & \times \left\{ h(T_3, p) \left( \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial p} + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial T_3} \frac{dT_{sat}}{dp} \right) + \rho(T_3, p) \left( \frac{\partial h(T_3, p)}{\partial p} + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial T_3} \frac{dT_{sat}}{dp} \right) - 1 \right\} \frac{dp}{dt} + \\
 & + (L - L_1 - L_2) A \left[ \frac{1}{2} \left[ h(T_3, p) \frac{\partial \rho(T_3, p)}{\partial T_3} + \rho(T_3, p) \frac{\partial h(T_3, p)}{\partial T_3} \right] \right] \frac{dT_{out}}{dt} = W_3 + \dot{m}_{23} h_v - \dot{m}_{out} h_{out}
 \end{aligned} \tag{153}$$

Da Equação 153 segue a Equação 30.

## APÊNDICE D – DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO PARA A FRAÇÃO MÉDIA DE VAZIOS $\bar{\chi}$

A densidade da mistura bifásica a uma altura  $z$  dentro da altura de ebulição  $L_2$  pode ser dada pela expressão:

$$\rho(z) = \rho_l - (\rho_l - \rho_v)\chi_z \quad (154)$$

onde  $\rho_l, \rho_v$  são respectivamente a densidade do líquido saturado e a densidade do vapor saturado, enquanto  $\chi_z$  é a fração de vazio dentro da mistura bifásica à altura  $z$ .

A qualidade da mistura bifásica à altura  $z$  é dada pela equação:

$$x_z = \frac{\chi_z \psi}{1 + (\psi - 1)\chi_z} \quad (155)$$

sendo

$$\psi = \left( \frac{v_l}{v_v} \right) S \quad (156)$$

onde  $S$  é a razão de escorregamento (*slip ratio*),  $v_l$  é o volume específico da fase líquida e  $v_v$  é o volume específico da fase do vapor.

Re-escrevendo a Equação 156 em função das densidades  $\rho_l$  e  $\rho_v$ , fica

$$\psi = \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right) S \quad (157)$$

Na saída da região bifásica, defina a qualidade

$$x_e = \frac{\chi_e \psi}{1 + (\psi - 1)\chi_e} \quad (158)$$

em que  $x_e$  e  $\chi_e$  são obtidos fazendo  $z = L_1 + L_2$  na Equação 155.

Supondo uma distribuição do fluxo de calor axialmente uniforme e que a qualidade é uma função linear de  $z$ , tem-se:

$$x(z) \equiv x_z = \frac{x_e}{L_2}(z - L_1) \quad (159)$$

A fração média de vazios  $\bar{\chi}$  pode ser calculada como o valor médio de  $\chi_z$  ao longo da altura de ebulição  $L_2$ :

$$\bar{\chi} = \frac{1}{L_2} \int_{L_1}^{L_1+L_2} \chi_z dz \quad (160)$$

Para resolvermos a integral acima, vamos primeiramente expressar  $dz$  em função de  $d\chi_z$ :

Das equações 155, 158 e 159, fica:

$$\frac{\chi_z}{1 + (\psi - 1)\chi_z} = \frac{1}{L_2} \cdot \frac{x_e}{1 + (\psi - 1)\chi_e} (z - L_1) \quad (161)$$

Derivando a Equação 161 em relação a  $\chi_z$ , obtém-se:

$$dz = L_2 \cdot \left[ \frac{1 + (\psi - 1)\chi_e}{\chi_e} \right] \cdot \left[ \frac{1}{(1 + (\psi - 1)\chi_z)^2} \right] d\chi_z \quad (162)$$

Para os novos limites de integração tem-se em concordância com a Equação 159:

$$z = L_1 \Rightarrow \chi_{L_1} = 0 \quad \text{e} \quad z = L_1 + L_2 \Rightarrow \chi_{L_1+L_2} = \chi_e$$

Com isso, a Equação 160 ficará assim:

$$\bar{\chi} = \left[ \frac{1 + (\psi - 1)\chi_e}{\chi_e} \right] \int_0^{\chi_e} \frac{\chi_z}{[1 + (\psi - 1)\chi_z]^2} d\chi_z \quad (163)$$

Resolvendo a integral dada na Equação 163, vem:

$$\bar{\chi} = \left[ \frac{1 + (\psi - 1)\chi_e}{\chi_e} \right] \cdot \left( \frac{1}{\psi - 1} \right)^2 \cdot \left\{ \frac{1}{1 + (\psi - 1)\chi_e} + \ln[1 + (\psi - 1)\chi_e] - 1 \right\} \quad (164)$$

Considerando que  $S = 1$  na Equação 157 e que  $x_e = 1$  na Equação 158, tem-se:

$$\psi = \frac{\rho_v}{\rho_l} \quad (165)$$

$$\chi_e = 1 \quad (166)$$

Substituindo as equações 165 e 166 na Equação 164, vem:

$$\bar{\chi} = \left( \frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_v} \right) \left\{ 1 - \frac{\rho_v}{\rho_l - \rho_v} \cdot \ln \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right) \right\} \quad (167)$$

Definindo  $\delta = \frac{\rho_v}{\rho_l - \rho_v}$  e substituindo na Equação 167 encontra-se finalmente:

$$\bar{\chi} = (1 + \delta) \cdot \left\{ 1 - \delta \cdot \ln \left( 1 + \frac{1}{\delta} \right) \right\} \quad (168)$$



## APÊNDICE F – DEDUÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO DO BORO NO PRIMÁRIO DO REATOR IRIS

O sistema de controle químico e volumétrico (SCQV) é projetado para regular as características químicas da água borada no Sistema de Refrigeração do Reator (SRR), a concentração de boro no SRR e a reposição de água borada do SRR.

O modelo a seguir descreve a dispersão do boro no refrigerante do circuito primário do reator.

Para tanto o SCQV é simplificado, sendo imaginado como dois tanques: um tanque para injeção de água borada no primário, e outro tanque por onde sai água borada do primário.

Os fenômenos de dispersão e de transporte do boro ocorrem simultaneamente, porém considerou-se representativo apenas o fenômeno de dispersão, considerada perfeita. Isto significa dizer que a concentração de boro na saída do volume de controle do fluido é igual à concentração média instantânea do volume.

Como em um reator tipo PWR há a possibilidade de formação de gases e bolhas diluídos no refrigerante do reator, admitiu-se que o boro só possa ser transportado pelo líquido refrigerante.

Sendo  $m_{B1}$  a massa de boro no tanque externo, diluída na massa de água  $m_1$ . Sendo  $m_{B2}$  a massa de boro diluída na massa de água  $m_2$  no tanque por onde sai a água borada do circuito primário e sendo  $m_B$  a massa de boro diluída na massa de água do primário  $M$ , tem-se para as concentrações do tanque de injeção, do tanque de saída e do primário, respectivamente:

$$\kappa_1 = \frac{m_{B1}}{m_1} \quad (169)$$

$$\kappa_2 = \frac{m_{B2}}{m_2} \quad (170)$$

$$\kappa = \frac{m_B}{M} \quad (171)$$

No instante  $t$ , pode-se re-escrever as equações 169, 170 e 171 do seguinte modo:

$$m_{B1}(t) = \kappa_1(t) m_1(t) \quad (172)$$

$$m_{B2}(t) = \kappa_2(t) m_2(t) \quad (173)$$

$$m_B(t) = \kappa(t) M(t) \quad (174)$$

Para um instante  $t + \Delta t$ , admitindo que sai do tanque de boro uma massa de boro igual a

$$\Delta m_{B1} = \kappa_1(t + \Delta t) \Delta m_1$$

e que nesse mesmo instante, entra no tanque de saída do primário uma massa de boro dada por

$$\Delta m_{B2} = \kappa_2(t + \Delta t) \Delta m_2$$

fica:

$$m_{B1}(t + \Delta t) = m_{B1}(t) - \Delta m_{B1} = \kappa_1(t) m_1(t) - \kappa_1(t + \Delta t) \Delta m_1 \quad (175)$$

$$m_{B2}(t + \Delta t) = m_{B2}(t) + \Delta m_{B2} = \kappa_2(t) m_2(t) + \kappa_2(t + \Delta t) \Delta m_2 \quad (176)$$

$$m_B(t + \Delta t) = \kappa(t + \Delta t) M(t + \Delta t) \quad (177)$$

Por outro lado, assumindo que a massa total de boro se conserva, vem:

$$m_B(t + \Delta t) + m_{B1}(t + \Delta t) + m_{B2}(t + \Delta t) = m_B(t) + m_{B1}(t) + m_{B2}(t) \quad (178)$$

Substituindo as equações 172, 173, 174, 175, 176 e 177 na Equação 178, obtém-se:

$$\kappa(t + \Delta t) M(t + \Delta t) - \kappa(t) M(t) = \kappa_1(t + \Delta t) \Delta m_1 - \kappa_2(t + \Delta t) \Delta m_2 \quad (179)$$

Dividindo a Equação 179 por  $\Delta t$  e tomando o limite com  $\Delta t \rightarrow 0$ , vem:

$$\frac{d}{dt}[\kappa(t)M(t)] = \kappa_1(t+\Delta t)\dot{m}_1 - \kappa_2(t+\Delta t)\dot{m}_2 \quad (180)$$

onde  $\dot{m}_1$  e  $\dot{m}_2$  são as vazões mássicas de água entrando e saindo respectivamente do primário do reator.

Supondo que  $\kappa_1(t+\Delta t) = \kappa_1(t) \equiv \kappa_1$  e  $\kappa_2(t+\Delta t) = \kappa_2(t) \equiv \kappa_2$  fica:

$$\frac{d}{dt}[\kappa(t)M(t)] = \kappa_1\dot{m}_1 - \kappa_2\dot{m}_2 \quad (181)$$

O modelo de dispersão de boro proposto por SILVA (2008) pode ser obtido fazendo as seguintes simplificações da Equação 180:

- massa de água do primário constante ( $M(t) = constante$ ) ;
- concentração de boro do tanque de saída igual à do primário ( $\kappa_2 = \kappa$ ) ;
- vazão mássicas de água entrando igual à vazão mássica saindo do primário do reator ( $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \equiv w$ ) ;

Empregando as simplificações acima e definindo  $\gamma = \frac{w}{M}$ , chega-se à Equação 53 proposta por SILVA (2008).

## APÊNDICE G – DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DO COEFICIENTE DE REATIVIDADE DEVIDO À CONCENTRAÇÃO DE ÁCIDO BÓRICO

Para um reator térmico, a contribuição do boro presente na solução à reatividade é dada por:

$$\rho_B = \frac{\bar{\Sigma}_{aB}}{\bar{\Sigma}_{aF} + \bar{\Sigma}_{aM}} \quad (182)$$

Em que  $\bar{\Sigma}_{aB}$ ,  $\bar{\Sigma}_{aF}$  e  $\bar{\Sigma}_{aM}$  representam, respectivamente, as seções térmicas macroscópicas médias do boro, combustível e moderador.

Dividindo a equação anterior por  $\bar{\Sigma}_{aM}$ , obtém-se:

$$\rho_B = \frac{\bar{\Sigma}_{aB} / \bar{\Sigma}_{aM}}{\bar{\Sigma}_{aF} / \bar{\Sigma}_{aM} + 1} \quad (183)$$

A concentração de  $H_3BO_3$  é normalmente especificada em ppm – um ppm significa que 1 g de boro para  $10^6$ g de água. Se  $C$  é a concentração em ppm, então, a razão entre a massa de boro e a de água pode ser dada por uma simples regra de três (admitindo a água como moderador):

$$\frac{m_B}{m_M} = C \times 10^{-6} \quad (184)$$

Os pesos atômico e molecular do boro e da água são, respectivamente, iguais a 10,8 e 18. Então, escrevendo em função das densidades atômica e molecular, obtém-se:

$$\frac{N_B}{N_M} = \frac{18}{10,8} \times C \times 10^{-6} \quad (185)$$

O termo  $\bar{\Sigma}_{aB} / \bar{\Sigma}_{aM}$  pode, assim, ser encontrado:

$$\frac{\bar{\Sigma}_{aB}}{\bar{\Sigma}_{aM}} = \frac{N_B \bar{\sigma}_{aB}}{N_M \bar{\sigma}_{aM}} = 1,92 \times C \times 10^{-3} \quad (186)$$

O fator de utilização térmica na ausência de boro é dado por:

$$f_0 = \frac{\bar{\Sigma}_{aF}}{\bar{\Sigma}_{aF} + \bar{\Sigma}_{aM}} \quad (187)$$

De onde obtém-se:

$$\frac{\bar{\Sigma}_{aF}}{\bar{\Sigma}_{aM}} = \frac{f_0}{1 - f_0} \quad (188)$$

Substituindo as equações 188 e 186 na Equação 183 e convertendo a reatividade para pcm, fica:

$$\rho_B = -192 \cdot C \cdot (1 - f_0) \quad (189)$$

em que o sinal negativo foi introduzido pelo fato de o boro absorver nêutrons, implicando a redução de potência de um reator.

O coeficiente de reatividade devido ao boro é definido por:

$$\alpha_B = \frac{d\rho_B}{dC} \quad (190)$$

Logo, encontra-se:

$$\alpha_B = -192 \cdot (1 - f_0) \quad (\text{pcm/ppm}) \quad (191)$$

## **ANEXOS**

## ANEXO A – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DA CINÉTICA PONTUAL PARA REATORES TÉRMICOS

A Equação da difusão de nêutrons é dada por:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla(D \nabla \phi) - \Sigma_a \phi + s \quad (192)$$

O termo de fonte de nêutrons térmicos  $s$  é dado por:

$$s = q + (1 - \beta)k_{\infty}\Sigma_a \phi + \lambda C \quad (193)$$

A distribuição de fluxo é determinada pela equação de autovalores, onde apenas o primeiro autovalor é significativo para um reator crítico:

$$\nabla^2 \phi + B^2 \phi = 0 \quad (194)$$

Considerando D constante, tem-se então:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -D B^2 \phi - \Sigma_a \phi + q + (1 - \beta)k_{\infty}\Sigma_a \phi + \lambda C \quad (195)$$

Usando as relações:  $\phi = n v$  e  $L^2 = \frac{D}{\Sigma_a}$

e como na cinética pontual, o fluxo é independente das coordenadas espaciais, vem:

$$\frac{dn}{dt} = -L^2 B^2 \Sigma_a n v - \Sigma_a n v + q + (1 - \beta)k_{\infty}\Sigma_a n v + \lambda C$$

reorganizando os termos obtém-se:

$$\frac{dn}{dt} = [(1 - \beta)k_{\infty} - (L^2 B^2 + 1)]\Sigma_a n v + q + \lambda C \quad (196)$$

Para reatores térmicos:  $k_{eff} = \frac{k_{\infty}}{1 + L^2 B^2}$

Com isso, pode-se re-escrever a Equação 196 assim:

$$\frac{dn}{dt} = \left[ (1 - \beta) - \frac{1}{k_{eff}} \right] k_{\infty} \Sigma_a n v + q + \lambda C \quad (197)$$

Sendo a reatividade dada por:

$$\rho = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}} \quad (198)$$

Substituindo a Equação 198 na Equação 197, resulta:

$$\frac{dn}{dt} = (\rho - \beta) k_{\infty} \Sigma_a n v + q + \lambda C \quad (199)$$

O tempo de vida dos nêutrons prontos em um reator térmico infinito é:

$$l_p = \frac{1}{\Sigma_a v} \quad (200)$$

O tempo efetivo no reator infinito é:

$$l_1 = \frac{l_p}{1 + B^2 L^2} \quad (201)$$

Sabendo-se que:

$$\Lambda = \frac{l_1}{k_{eff}} \quad (202)$$

Encontra-se:

$$\Lambda = \frac{l_p}{k_{eff}(1 + B^2 L^2)} = \frac{1}{k_{\infty} \Sigma_a v} \quad (203)$$

Substituindo a Equação 203 na Equação 199, tem-se finalmente:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{(\rho - \beta)}{\Lambda} n + q + \lambda C \quad (204)$$

Para a concentração do precursor, tem-se:

$$\frac{dC}{dt} = \beta k_{\infty} \Sigma_a \phi - \lambda C \quad (205)$$

Substituindo a equação  $\phi = n v$  e a Equação 203 na Equação 205, encontra-se:

$$\frac{dC}{dt} = \left( \frac{\beta}{\Lambda} \right) n - \lambda C \quad (206)$$

## ANEXO B – PARÂMETROS NEUTRÔNICOS E TERMOIDRÁULICOS EMPREGADOS NA INICIALIZAÇÃO DO CÓDIGO MODIRIS

As tabelas a seguir apresentam os parâmetros neutrônicos (WESTINGHOUSE, 2003c) e termoidráulicos (WESTINGHOUSE, 2003b) empregados no código MODIRIS.

Parâmetros Neutrônicos	Valor
Coeficiente de reatividade do combustível, $\alpha_f [pcm/K]$	-6,5
Coeficiente de reatividade do moderador, $\alpha_c [pcm/K]$	-72
Coeficiente de reatividade do boro, $\alpha_B [pcm/ppm]$	-5
Fração total de nêutrons atrasados, $\beta [pcm]$	650
Constante de decaimento dos precursores de nêutrons atrasados, $\lambda [s^{-1}]$	0,08
Tempo médio de geração entre o nascimento de nêutrons e a subsequente absorção induzindo fissão, $\Lambda [s]$	$20 \times 10^{-6}$
Parâmetros Termoidráulicos do Circuito Primário	Valor
Potência térmica de referência, $P_0 [kW]$	$10^6$
Vazão de referência do primário, $Q_0 [kg/s]$	4720,00
Temperatura inicial do plenum inferior, $T_{lp0} [^{\circ}C]$	291,75
Temperatura inicial do refrigerante, $T_{co} [^{\circ}C]$	309,96
Temperatura inicial do plenum superior, $T_{so} [^{\circ}C]$	328,18
Temperatura inicial média do combustível, $T_{f0} [^{\circ}C]$	800,00
Massa de água residente no plenum inferior, $m_{lp} [kg]$	9779,55
Massa de água residente no plenum superior, $m_o [kg]$	9779,55
Massa do combustível, $m_f [kg]$	48500,00
Calor específico do combustível, $c_f [kJ/kg K]$	0,30
Massa de refrigerante residente no núcleo, $m_c [kg]$	74,31
Constante de tempo característica da bomba, $\tau_p [s]$	4,00
Temperatura inicial da água do SG primário na entrada, $T_{SGI} [^{\circ}C]$	309,97
Temperatura inicial da água do SG primário na saída, $T_{SGO} [^{\circ}C]$	291,75
Massa de água na zona primária do SG, $m_w [kg]$	49046,38
Calor específico do SG primário, $c_w [kJ/kg K]$	5,82

Parâmetros Termoidrúlicos do Circuito Secundário	Valor
Pressão do secundário, $p$ [bar]	60
Temperatura de água na entrada do secundário, $T_{in}$ [ $^{\circ}C$ ]	220
Vazão de alimentação do líquido, $\dot{m}_{in}$ [kg/s]	500
Comprimento do feixe de tubos, $L$ [m]	32
Área da secção reta do feixe de tubos, $A$ [ $m^2$ ]	0,7214
Temperatura de saturação, $T_{sat}$ [ $^{\circ}C$ ]	275.59
Temperatura do vapor na saída do SG, $T_{out}$ [ $^{\circ}C$ ]	317,25