



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

MODELAGEM DINÂMICA DO CIRCUITO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO DE REATORES PWR APLICANDO CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE

Hugo Pontes Galvão

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Nuclear da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Alessandro da Cruz Gonçalves e
Marco Antonio Bayout Alvarenga

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2017

Hugo Pontes Galvão

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO NUCLEAR.

Examinado por:

Prof. Alessandro da Cruz Gonçalves

Dr. Marco Antonio Bayout Alvarenga

Prof. José Antonio Carlos Canedo Medeiros

Dr. Zelmo Rodrigues de Lima

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO de 2017

Galvão, Hugo Pontes

Modelagem Dinâmica do circuito Primário e Secundário de Reatores PWR Aplicando Critérios de Estabilidade / Hugo Pontes Galvão – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2017.

IX, 74 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Alessandro da Cruz Gonçalves e Marco Antonio Bayout Alvarenga.

Projeto de Graduação – UFRJ/POLI/ Engenharia Nuclear, 2017.

Referencias Bibliográficas: p.

1. Modelo Dinâmico. 2. Reator PWR 3. Circuito Primário e Secundário 4. Estabilidade Operacional. I. Alessandro da Cruz Gonçalves e Marco Antonio Bayout Alvarenga. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Nuclear III. Modelagem Dinâmica do circuito Primário e Secundário de Reatores PWR Aplicando Critérios de Estabilidade.

Agradecimentos

Em primeiro Lugar Agradeço a Deus, por sempre me guiar nas minhas decisões. Ao meus pais por serem uma base fundamental em minha vida e por terem me ensinado que a humildade é a maior virtude de um ser humano.

Agradeço a todos os Professores do Programa de Engenharia Nuclear da Universidade Federal do Rio de Janeiro, por serem excelentes profissionais que sempre se engajaram na formação dos alunos deste curso. Faço aqui uma dedicatória especial aos professores Alessandro da Cruz Gonçalves e Marco Antonio Bayout Alvarenga, por terem sido grandes orientadores que me apoiaram em todas as questões as quais os solicitei.

Ao Professor Aldo Muro do Instituto Federal de Goiás que me incentivou e ajudou a tomar a decisão de mudar de estado e entrar no curso de Engenharia Nuclear, o que hoje reflito como uma sábia decisão. Ao engenheiro Carlos Eduardo Brügger, da Superintendência de Gerência de combustível e segurança nuclear da Eletrobrás – Eletronuclear, que me ajudou a compreender alguns dos pontos importantes no funcionamento de uma usina nuclear.

A todos os amigos de curso, os quais sempre estiveram ao meu lado e me fizeram ter excelentes dias dentro desta Universidade.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Nuclear.

MODELAGEM DINÂMICA DO CIRCUITO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO DE REATORES PWR APLICANDO CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE

Hugo Pontes Galvão

Fevereiro/2017

Orientadores: Alessandro da Cruz Gonçalves e Marco Antonio Bayout Alvarenga

Curso: Engenharia Nuclear

Este Trabalho apresenta uma simulação dinâmica do circuito primário e secundário de reatores PWR, considerando alguns sistemas de controle presentes na estrutura do reator tais como: Controle da Potência por meio das barras de controle, Aquecedores e Aspersores do Pressurizador, Controle de nível de água no gerador de vapor e Controle da vazão de vapor no circuito secundário.

Para Avaliar o Comportamento dinâmico das equações desenvolvidas neste trabalho, foram propostas algumas perturbações, ou seja, foram aplicadas algumas condições iniciais para determinadas expressões e a seguir através de monitoramento gráfico foi avaliada a natureza dinâmica do sistema modelado. Também foram empregados conceitos de estabilidade como o Critério de estabilidade de Nyquist e o Diagrama de Bode com intuito de ter ferramentas adicionais que garantem a estabilidade do projeto.

Os Dados Utilizados neste Trabalho são referentes às Usinas de Angra 2 e H. B. Robinson. Para ambos os casos simulados a modelagem apresentou resultados com uma oscilação inicial, mas que foi equilibrada para o estado estacionário pelos sistemas de controle utilizados e também cumpriu com os critérios de estabilidade que foram propostos.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Nuclear Engineer.

DYNAMIC SIMULATION OF A PWR, MODELING THE PRIMARY AND SECONDARY SYSTEM, APPLYING STABILITY CRITERIA

Hugo Pontes Galvão

Fevereiro/2017

Advisors: Alessandro da Cruz Gonçalves e Marco Antonio Bayout Alvarenga

Course: Nuclear Engineering

This paper presents the dynamic simulation of primary system and secondary system of PWR reactors, using controls systems such as Power control through of control rods, pressurizer heaters and spray, Control of water level in steam generators and control of steam pressure in secondary system.

The dynamic behavior of equations developed in this work was evaluated through some transients, in other words some initial conditions were applied for certain expressions. The results of modeling were presented through graphic monitoring. Stability concepts such as the Nyquist Stability Criterion and the Bode Diagram were also employed in order to have additional tools that ensure design stability.

Data from Angra 2 and H. B. Robinson plants were used. The results for both cases showed an initial oscillation, however, the Controls system acted in the sense of maintain the steady state. Proposed Stability criteria were met.

Sumário

1.	Introdução	1
2.	Conceitos Iniciais	4
2.1.	Modelagem Dinâmica	4
2.2.	Equações Básicas	4
2.3.	Linearização	6
2.4.	Sistemas de controle do reator	6
2.5.	Controladores PID.....	8
3	Modelagem Dinâmica	10
3.1.	Modelagem do Núcleo do reator	10
3.2.	Modelagem Do Pressurizador	13
3.3.	Modelagem Do Gerador de Vapor	15
3.4.	Sistema de Controle do Nível de Água no Gerador de Vapor	16
3.5.	Modelagem Do Circuito Secundário.....	18
3.6.	Sistema de Controle da Válvula da linha de Vapor principal	20
4	CrITÉrios de Estabilidade	22
4.1.	Espaço de Estados	22
4.2.	Redução das equações algébricas.....	22
4.3.	Função de transferência.....	25
4.4.	CrITÉrio de Estabilidade de Nyquist.....	25
4.5.	CrITÉrio de Estabilidade de Bode.....	28
5.	Resultados	30
5.1.	Simulação Dinâmica de Angra 2.....	30
5.2.	Discussão dos Resultados de Angra 2.....	45
5.3.	Simulação Dinâmica de H. B. Robinson.....	47
5.4.	Discussão dos Resultados de H. B. Robinson.....	53
6.	Conclusão.....	55
	Referências.....	58
	Apêndice A.....	60
	Apêndice B.....	63
	Apêndice C.....	67
	Apêndice D.....	71
	Apêndice E.....	73

Lista de Figuras

Figura 1 - Esquema de Um Reator do tipo PWR [2]	1
Figura 2 - Usina nuclear de Angra 2	3
Figura 3 - Usina nuclear de H. B. Robinson	3
Figura 4 - Modelagem do Vaso de Pressão.....	10
Figura 5 - Modelagem do Pressurizador	13
Figura 6 - Modelagem do Gerador de vapor	15
Figura 7 - Representação do sistema de controle de nível no gerador de vapor	16
Figura 8 - Modelagem do Circuito Secundário.....	18
Figura 9 - Representação completa da modelagem dinâmica	21
Figura 10 - Diagrama em blocos para um sistema retroalimentado.....	26
Figura 11 - Critério de Nyquist [14]	27
Figura 12 - Critério de Estabilidade de Bode [14]	29
Figura 13 - Variação da potência nuclear	31
Figura 14 - Variação da temperatura do combustível	31
Figura 15 - Variação da temperatura do refrigerante zona 1.....	31
Figura 16 - Variação da temperatura do refrigerante zona 2.....	32
Figura 17 - Variação da temperatura do <i>plenum</i> superior do vaso de pressão.....	32
Figura 18 - Variação da temperatura do <i>plenum</i> inferior do vaso de pressão.....	32
Figura 19 - Variação da temperatura na perna fria.....	33
Figura 20 - Variação da temperatura na perna quente	33
Figura 21 - Reatividade inserida pelas barras de controle.....	33
Figura 22 - Variação da pressão no primário no pressurizador.....	34
Figura 23 - Variação na potência dos aquecedores	34
Figura 24 - Variação na vazão dos aspersores do pressurizador	34
Figura 25 - Variação da temperatura do <i>plenum</i> de entrada do GV	35
Figura 26 - Variação da temperatura do <i>plenum</i> de saída do GV	35
Figura 27 - Variação na temperatura dos tubos de metal do GV	35
Figura 28 - Variação na temperatura da água dentro dos tubos do GV	36
Figura 29 - Variação na pressão de vapor que sai do GV	36
Figura 30 - Variação no nível de água dentro do GV	36
Figura 31 - Variação na densidade de vapor no bocal de entrada da turbina de alta pressão	37
Figura 32 - Variação na entalpia de vapor no bocal de entrada da turbina de alta pressão.....	37
Figura 33 - Variação no fluxo mássico de vapor que entra no separador de umidade.....	37
Figura 34 - Variação na densidade de vapor no reaquecedor.....	38
Figura 35 - Variação na entalpia de vapor no reaquecedor	38
Figura 36 - Variação no fluxo mássico de vapor que sai do reaquecedor.....	38
Figura 37 - Variação do calor transferido no reaquecedor (Parte externa aos tubos)	39
Figura 38 - Variação do fluxo mássico que sai da turbina de baixa pressão.....	39
Figura 39 - Variação na entalpia da água do aquecedor 1.....	39
Figura 40 - Variação na temperatura da água que sai do aquecedor 2.....	40
Figura 41 - Variação no fluxo mássico que sai do aquecedor 2.....	40
Figura 42 - Variação na entalpia da água de alimentação	40
Figura 43 - Variação na vazão da água de alimentação	41
Figura 44 - Variação no coeficiente da válvula de vapor.....	41
Figura 45 - Variação na frequência de rotação do gerador elétrico	41
Figura 46 - Variação na potência da rede elétrica.....	42

Figura 47 - Polos e zeros da função de transferência de malha aberta.....	42
Figura 48 - Valores numéricos dos polos e zeros.....	43
Figura 49 - Diagrama de Nyquist.....	44
Figura 50 - Diagrama de Bode	44
Figura 51 - Variação da potência nuclear (HBR).....	47
Figura 52 - Variação da temperatura do combustível (HBR)	48
Figura 53 - Variação da temperatura do refrigerante zona 2 (HBR).....	48
Figura 54 - Variação da temperatura do <i>plenum</i> inferior (HBR)	48
Figura 55 - Variação da pressão no pressurizador (HBR)	49
Figura 56 - Variação na pressão de vapor na saída do gerado de vapor (HBR).....	49
Figura 57 - Variação na vazão da água de alimentação (HBR)	49
Figura 58 - Variação no coeficiente da válvula de vapor (HBR).....	50
Figura 59 - Polos e zeros da função de transferência de malha aberta (HBR).....	50
Figura 60 - Valores numéricos dos polos e zeros (HBR).....	51
Figura 61 - Diagrama de Nyquist (HBR).....	52
Figura 62 - Diagrama de Bode (HBR)	52

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na modelagem do núcleo do reator	63
Tabela 2 - Parâmetros utilizados na modelagem das tubulações e <i>plenums</i>	63
Tabela 3 - Parâmetros utilizados na modelagem do gerador de vapor	64
Tabela 4 - Parâmetros utilizados na modelagem do sistema de controle do gerador de vapor ..	64
Tabela 5 - Parâmetros utilizados na modelagem do pressurizador	65
Tabela 6 - Parâmetros utilizados na modelagem no sistema de controle da válvula de vapor ...	65
Tabela 7 - Parâmetros utilizados na modelagem do circuito secundário	66
Tabela 8 - Parâmetros utilizados na modelagem do núcleo do reator (HBR)	67
Tabela 9 - Parâmetros utilizados na modelagem das tubulações e <i>plenums</i> (HBR).....	67
Tabela 10 - Parâmetros utilizados na modelagem do gerador de vapor (HBR)	68
Tabela 11 - Parâmetros utilizados na modelagem do sistema de controle do gerador de vapor (HBR).....	68
Tabela 12 - Parâmetros utilizados na modelagem do pressurizador (HBR).....	69
Tabela 13 - Parâmetros utilizados na modelagem no sistema de controle da válvula de vapor (HBR).....	69
Tabela 14 - Parâmetros utilizados na modelagem do circuito secundário (HBR).....	70
Tabela 15 - Matriz de estado do sistema dinâmico para Angra 2 (Parte 1).....	71
Tabela 16 - Matriz de estado do sistema dinâmico para Angra 2 (Parte 2).....	72
Tabela 17 - Matriz de estado do sistema dinâmico para H. B. Robinson (Parte 1).....	73
Tabela 18 - Matriz de estado do sistema dinâmico para H. B. Robinson (Parte 2).....	74

1. Introdução

Uma usina nuclear tem como objetivo gerar energia elétrica a uma determinada taxa, e para isso existe uma série de conceitos de reatores nucleares pelo mundo com a capacidade de geração nucleoeletrônica. O modelo de reator nuclear mais utilizado no mundo são os Reatores de Água Pressurizada (PWR) correspondendo a uma quantidade de 64 % dos atualmente utilizados [1]. Abaixo segue a figura 1, que seria uma representação didática de um reator nuclear do tipo PWR.

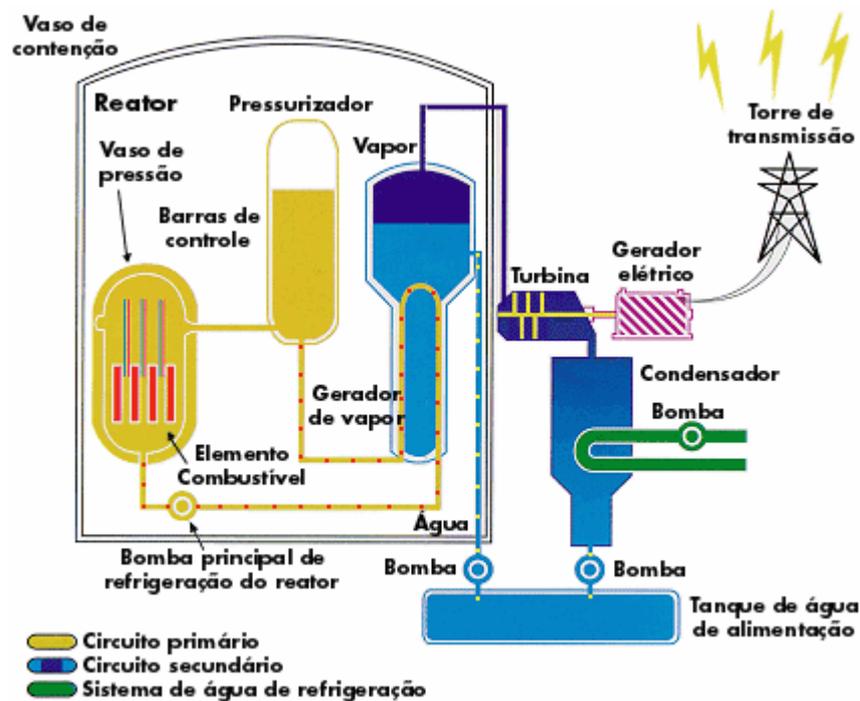


Figura 1 - Esquema de Um Reator do tipo PWR [2]

No circuito primário do reator tem-se o vaso de pressão, que é a parte estrutural do sistema primário onde estão contidos os elementos combustíveis e onde o processo de reação em cadeia de nêutrons ocorre através do urânio (U^{235} principalmente). Dentro deste componente também se encontram as barras de controle que são feitas de materiais com alta capacidade de absorção de nêutrons, como o cádmio, podendo atuar no sentido de manter a reação em cadeia sob controle.

O líquido de refrigeração usado nos circuitos de um PWR é água que além desta capacidade, atua também como um bom moderador de nêutrons e ainda como refletor [3]. Como o sistema é pressurizado a água contida em todo circuito primário se encontra na fase líquida, ao passar pelo vaso de pressão a água eleva sua temperatura e sai do vaso

por tubulações que comumente são chamadas de perna quente, seguindo em direção aos geradores de vapor, onde passa por uma grande quantidade de tubos metálicos no formato de um U invertido e transfere o calor para estes tubos. Após este processo a água é novamente direcionada ao vaso de pressão pela atuação das bombas principais de remoção de calor e chegam ao núcleo através de tubulações denominadas de perna fria.

O pressurizador é composto basicamente por uma linha de conexão com o circuito primário, um conjunto de aspersores na sua parte superior, onde encontra-se vapor d'água, um conjunto de aquecedores elétricos presentes na parte inferior deste sistema e também um conjunto de válvulas de alívio e segurança que podem atuar em casos em que a pressão do circuito seja demasiadamente elevada. Este componente tem por objetivo manter o nível de pressão adequado, bem como acomodar as alterações volumétricas do refrigerante dentro do circuito primário.

O calor que foi depositado nos tubos metálicos pela água do primário é retirado pela água do circuito secundário, que na entrada do gerador de vapor está na condição de líquido sub-resfriado. Ao entrar em contato com os tubos, a água atinge sua temperatura de saturação, e começa então a ter formação de vapor que pela diferença de densidade é concentrado na parte superior do gerador de vapor. A partir daí o vapor d'água passa por um processo de secagem, e é então conduzido por meio de tubulações para as turbinas.

Nas turbinas de alta e baixa pressão ocorrem expansões do vapor que transformam parte de sua energia térmica em energia cinética de rotação do eixo da turbina [4]. As turbinas por sua vez estão acopladas a um gerador elétrico, onde a energia elétrica é produzida. Após passar pela turbina de baixa pressão, a mistura água e vapor é conduzida para o condensador, onde a mistura troca calor com um terceiro circuito (sistema de água de serviço), que é a fonte fria para remoção de calor da instalação nuclear; comumente essa fonte são rios, mares e lagos. Na saída do condensador a água está na fase líquida, onde a mesma passará por estágios de pré-aquecimentos de baixa e alta pressão, e retornará ao gerador de vapor, concluindo assim as etapas dentro do circuito secundário.

O circuito primário, secundário e a fonte fria da usina, atuam com separação física entre eles, portanto, uma concepção interessante do ponto de vista da segurança nuclear, já que existem barreiras independentes com capacidade de conter os produtos de fissão nuclear oriundos de alguma falha que possa ocorrer no elemento combustível. A interface entre o circuito primário e o secundário se dá nos geradores de vapor, e normalmente nos reatores nucleares do tipo PWR, há a presença de 2 a 4 ciclos fechados, que também são usualmente chamados de *Loops*. A quantidade de *Loops* está intimamente ligada a

potência térmica da instalação nuclear, assim usinas que operam sob maior potência, necessitam retirar uma maior quantidade de calor através do circuito secundário, aqui também fica visível que a quantidade de geradores de vapor necessário para a planta é igual à quantidade de *Loops* utilizados.

Toda modelagem feita neste trabalho foi baseada nas usinas nucleares de Angra 2 e H. B. Hobinson. A usina de Angra 2 que conjuntamente com Angra 1 formam a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, está situada na praia de Itaorna, no município de Angra dos Reis ($23^{\circ} 00' 27'' S$, $44^{\circ} 27' 30'' O$). Angra 2 surgiu de um acordo assinado entre Brasil e Alemanha em 1975, começou a ser construída em 1986, e em 2001 entrou em operação, permitindo economizar água dos reservatórios das hidrelétricas e amenizando as consequências do racionamento de energia [2].

A usina de Angra 2 é um reator de água pressurizada (PWR) de tecnologia alemã, com potência elétrica de 1350 megawatts, e sozinha é capaz de atender uma cidade com 2 milhões de habitantes, como Belo Horizonte [2].



Figura 2 - Usina nuclear de Angra 2

A usina de H. B. Hobinson fica localizada nos Estados Unidos Da América, no estado da Carolina do Norte ($34^{\circ} 24' 10'' N$, $80^{\circ} 9' 30'' O$) também é um reator PWR de tecnologia americana, mas com potência elétrica de 750 megawatts [5].



Figura 3 - Usina nuclear de H. B. Robinson

2. Conceitos Iniciais

Neste capítulo serão apresentadas concepções básicas que formam uma contextualização teórica para entendimento dos assuntos que serão apresentados posteriormente.

2.1. Modelagem Dinâmica

A construção de modelos matemáticos quantitativos de sistemas físicos permite analisar e controlar sistemas importantes tais como: mecânicos, hidráulicos e elétricos [6]. Um modelo que apresenta uma natureza dinâmica implica dizer que as equações matemáticas que modelam componentes, estruturas e parâmetros interagem entre si e se modificam ao longo do tempo, caso contrário estes ambientes seriam ditos como estáticos.

O sistema físico modelado ainda pode apresentar características como ser um sistema fechado ou aberto. Um sistema fechado ele terá uma realimentação que alterará o comportamento de todo ciclo, mas que também poderá ser controlado a fim de manter a estabilidade do sistema. Este tema será melhor desenvolvido no capítulo 4.

O objetivo de trabalhar com modelos dinâmicos é fazer uma análise de situações de transientes, ou seja, situações em que o comportamento operacional da instalação nuclear é alterado ou até mesmo para avaliar a evolução de acidentes postulados, como o caso de um acidente com perda de líquido de refrigeração (LOCA - *Loss of Coolant Accident*) e avaliar o desempenho e o projeto dos sistemas de controle sob estas condições, bem como as condições de estabilidade. Normalmente, este estudo é feito analisando o comportamento do sistema com pequenas perturbações em torno de um ponto de operação, o que se consegue através da linearização das equações dinâmicas do sistema.

2.2. Equações Básicas

Para o desenvolvimento do modelo dinâmico, foi necessário aplicar uma série de volumes de controle, ou seja, regiões que delimitam um determinado componente de interesse, e aplicar conceitos de conservação de massa e energia, bem como a conservação

do momento linear para estes volumes. Essas equações são apresentadas abaixo, e podem ser encontradas em [7].

2.2.1. Princípio de conservação da massa

$$\frac{dm}{dt} = W_e - W_s \quad (1)$$

Onde:

$\frac{dm}{dt}$ = Variação temporal mássica no volume de controle

W_e = Vazão mássica na entrada do volume de controle

W_s = Vazão mássica na saída do volume de controle

2.2.2. Princípio de conservação de energia

$$\frac{du}{dt} = Q_e - Q_s \quad (2)$$

Onde:

$\frac{dU}{dt}$ = Variação temporal da energia interna no volume de controle

Q_e = Taxa energética entrando no volume de controle

Q_s = Taxa energética saindo do volume de controle

2.2.3. Princípio de conservação do momento linear

$$\frac{d(mv)}{dt} = F_p + F_a + F_g \quad (3)$$

Onde:

$\frac{d(mv)}{dt}$ = Variação temporal do momento linear no volume de controle

F_p = Força devida a pressão atuando no volume de controle

F_a = Força de atrito paralela ao escoamento do fluido no volume de controle

F_g = Força da gravidade

2.3. Linearização

Ao desenvolver algumas das equações que modelam componentes do reator nuclear, é comum obter resultados que não apresentam comportamento linear, ou seja, expressões que contêm termos de ordem igual a dois ou superior. A vantagem de trabalhar com um modelo linearizado, além de uma solução mais simples é a possibilidade de fazer análises da matriz dos coeficientes destas equações diferenciais de primeira ordem, bem como aplicar a transformada de Laplace e poder obter uma resposta da estabilidade do seu modelo dinâmico no domínio da frequência [6].

A ideia básica para linearização de uma equação é aplicar uma perturbação (delta) em torno do ponto de equilíbrio das variáveis do sistema, conforme apresentado nas equações abaixo:

$$z = y x \quad (4)$$

$$(z_0 + \delta_z) = (y_0 + \delta_y)(x_0 + \delta_x) \quad (5)$$

$$z_0 + \delta_z = y_0 x_0 + y_0 \delta_x + \delta_y x_0 + \delta_y \delta_x \quad (6)$$

Sendo $z_0 = y_0 x_0$ e também desprezando o termo de ordem superior, temos:

$$\delta_z = y_0 \delta_x + \delta_y x_0 \quad (7)$$

Portanto, tem-se a formulação linear da equação. Vale ressaltar que sistemas lineares respeitam o princípio de superposição e homogeneidade, portanto, apresentam respostas que são proporcionais as perturbações de entrada.

2.4. Sistemas de controle do reator

Em um reator nuclear do tipo PWR existem alguns mecanismos que permitem um ajuste do comportamento operacional em casos de transientes. Os quatro principais sistemas de controle de uma planta nuclear são [8]:

- ❖ Controle de potência do reator;
- ❖ Controle de nível e pressão no pressurizador
- ❖ Controle de nível e pressão no gerador de vapor;
- ❖ Controle de vazão de vapor para as turbinas.

O controle da potência pode ser realizado por meio das barras de controle que no caso de serem inseridas de forma gradual, atuam no sentido de absorção de nêutrons, e estas também podem ser retiradas de forma a aumentar a população de nêutrons em caso de subpotência. Dentro do vaso de pressão do reator existem também as barras de desligamento que atuam quando um determinado parâmetro de controle da usina atingiu um valor que está fora da faixa permitida para operação. Estas barras caem pela atuação da gravidade e cessam a reação em cadeia.

Para elucidar a importância dos sistemas de controle em uma instalação nuclear, poderíamos imaginar um transiente provocado no circuito primário em que houvesse o aumento da pressão, fazendo com que houvesse o colapso dos vazios no refrigerante. Nas equações dinâmicas este fenômeno será representado como o efeito líquido (moderação mais absorção de nêutrons) do coeficiente negativo de reatividade devido à pressão (chamado de coeficiente de vazios), o que contribui para a estabilidade do sistema.

Neste transiente poderia haver também o aumento ou diminuição de temperatura, provocada pela maior geração de energia no núcleo ou pela remoção excessiva de energia pelo secundário, por exemplo. Este efeito geraria respectivamente uma expansão ou contração do líquido de refrigeração e causaria respectivamente uma perda ou ganho na capacidade de moderação dos nêutrons no núcleo do reator e, portanto, haveria respectivamente uma condição pior, ou melhor, para formação de nêutrons térmicos, que são os maiores responsáveis pelo processo de fissão do urânio e conseqüentemente ocorreria uma perda ou ganho na potência nuclear, compensada pela menor ou maior absorção de nêutrons. O efeito líquido será um coeficiente negativo de reatividade devido à temperatura do refrigerante/moderador.

Para atuar no sentido de manter a estabilidade, os aquecedores do pressurizador iriam atuar, no caso de queda de pressão no circuito primário, aumentando a pressão e o volume no espaço de vapor do pressurizador, provocando uma contração do refrigerante ao longo do sistema primário, como consequência do aumento da pressão no circuito, evitando assim a ebulição do refrigerante e protegendo o reator contra a diminuição da margem para formação de fluxo crítico de calor (*DNBR - Departure of Nucleate Boiling Rate*) e conseqüentemente evitando uma transferência de calor deteriorada e o aumento das temperaturas no combustível, no seu revestimento e no moderador.

As válvulas da linha de vapor do circuito secundário também poderiam atuar, no sentido de permitir fluir uma maior vazão de vapor, controlando qualquer aumento de pressão gerado no circuito primário, protegendo o reator contra sobrepressões que possam

danificar ou mesmo romper as fronteiras do circuito primário. Dependendo da variação do nível de potência, as barras de controle também poderiam atuar a fim de manter o equilíbrio no reator, através da inserção ou remoção de reatividade no núcleo.

De acordo com [6] um sistema de controle com realimentação é uma forma de estabelecer uma relação de comparação entre uma saída e uma entrada de referência, utilizando a diferença como meio de controle, ou seja, a partir de uma perturbação gerada (entrada), teríamos uma resposta da instalação, que permitiria atuar os sistemas de controle da usina nuclear, com intuito de minimizar o efeito provocado, mantendo os valores das variáveis dentro de uma região admissível de projeto (limites inferiores e superiores), e trazer o sistema para um novo ponto de equilíbrio.

2.5. Controladores PID

A técnica de controle PID consiste em calcular um valor de atuação sobre o sistema modelado, a partir de informações sobre o valor desejado e o valor atual da variável de processo [9]. O valor de atuação é transformado num sinal adequado para atuar em componentes (válvulas, motor, relé) a fim de permitir que a variável de processo possa atingir um valor de referência. A sigla PID advém do fato do controle ser subdividido nas partes: Proporcional, Integral e Derivativo, que representa as contribuições devido à variação presente, passada e futura (preditiva, ao considerar a velocidade ou taxa de variação). A equação (8) é uma clássica formulação para este tipo de controle, e exemplifica de melhor maneira essa subdivisão.

$$MV(t) = k_p e(t) + k_I \int e(t) dt + k_D \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

Sendo:

k_p – Ganho da parcela proporcional

k_I – Ganho da parcela integral

k_D – Ganho da parcela derivativa

$e(t)$ – Erro

$MV(t)$ – Variável manipulada

A equação (8) em termos da função de transferência (conceito detalhado no capítulo 4) deste tipo de controle é representada por:

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_I}{s} + k_D s \quad (9)$$

Para $k_D = 0$, tem-se um controle proporcional e integral (PI), resultando em:

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_I}{s} \quad (10)$$

Estes conceitos foram aplicados no sistema de controle do nível do gerador de vapor e também para a válvula de vapor principal, e suas expressões podem ser consultadas no Capítulo 3.

3 Modelagem Dinâmica

Neste capítulo serão apresentadas as expressões utilizadas para modelar os principais componentes do circuito primário e secundário da usina nuclear de Angra 2 e H. B. Robinson. Os valores de todos os parâmetros necessários para o cálculo do modelo podem ser acessados no apêndice B (Angra 2) e apêndice C (H. B. Robinson). Para o melhor entendimento de como as expressões foram formuladas, torna-se necessário uma consulta às referências [10], [11] e [12]. As definições das variáveis nas expressões (equações diferenciais) abaixo se encontram no Apêndice B.

3.1. Modelagem do Vaso de Pressão do Reator

O *software* gráfico utilizado para criar as figuras deste capítulo encontra-se em [13].

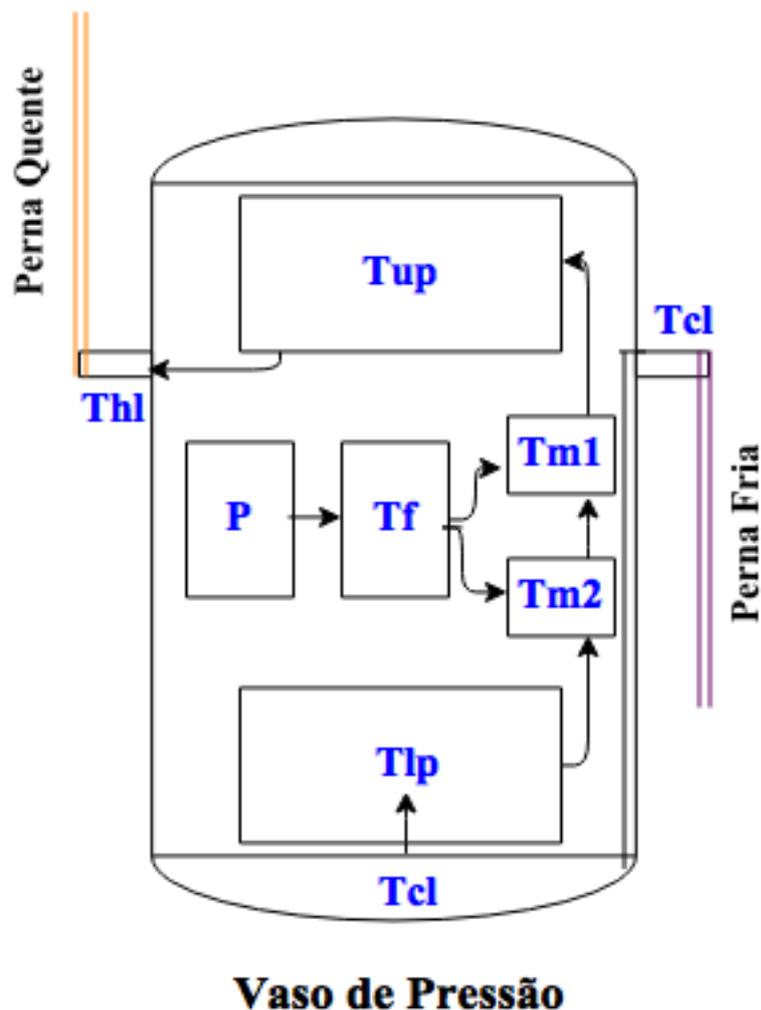


Figura 4 - Modelagem do Vaso de Pressão

3.1.1 Potência térmica no núcleo do reator (primeira equação da cinética de reatores nucleares):

$$\frac{d\delta P}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} \delta P + \sum_1^6 \lambda_i \delta C_i \quad (11)$$

$$\rho = \delta\rho_b + \alpha_f \delta T_f + \frac{\alpha_m \delta T_{m1}}{2} + \frac{\alpha_m \delta T_{m2}}{2} + \alpha_p \delta P_{rz} + \rho_{ext} \quad (12)$$

3.1.2 Reatividade inserida pelas barras de controle:

$$\frac{d\delta\rho_b}{dt} = R_s V_s \varepsilon \quad (13)$$

Sendo ε a média da variação da temperatura na perna quente e na perna fria:

$$\varepsilon = \frac{\delta T_{hl} + \delta T_{cl}}{2} \quad (14)$$

A inserção de reatividade pela equação (13) foi modelada considerando uma faixa de valores da diferença de temperatura conforme (15)

$$\frac{d\delta\rho_b}{dt}(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{72R_s}{60} & se \ \varepsilon > 5, e \ -\frac{72R_s}{60} & se \ \varepsilon < -5 \\ \frac{32R_s\varepsilon}{60} & se \ 3 \leq \varepsilon \leq 5, e \ -\frac{32R_s\varepsilon}{60} & se \ -3 \leq \varepsilon \leq -5 \\ \frac{8R_s}{60} & se \ 1 \leq \varepsilon < 3, e \ -\frac{8R_s}{60} & se \ -1 \leq \varepsilon < -3 \end{cases} \quad (15)$$

3.1.3 Potência associada ao grupo de precursores (segunda equação da cinética de reatores nucleares):

$$\frac{d\delta C_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} \delta P - \lambda_i \delta C_i \quad (16)$$

3.1.4 Variação temporal da temperatura do combustível nuclear:

$$\frac{d\delta T_f}{dt} = \frac{[\delta P P_0 10^6 - h \delta T_f + h \delta T_{m2}]}{M_f C p_f} \quad (17)$$

3.1.5 Variação temporal da temperatura do refrigerante na zona 1:

$$\frac{d\delta T_{m1}}{dt} = \frac{[h\delta T_f + (2Cp_c W_c + h)\delta T_{m2} - 2Cp_c W_c \delta T_{m1}]}{M_c Cp_c} \quad (18)$$

3.1.6 Variação temporal da temperatura do refrigerante na zona 2

$$\frac{d\delta T_{m2}}{dt} = \frac{[h\delta T_f - (2Cp_c W_c + h)\delta T_{m2} + 2Cp_c W_c \delta T_{lp}]}{M_c Cp_c} \quad (19)$$

3.1.7 Variação temporal da temperatura da perna quente

$$\frac{d\delta T_{hl}}{dt} = \frac{[\delta T_{up} - \delta T_{hl}]}{V_{hl} d} W_c \quad (20)$$

3.1.8 Variação temporal da temperatura da perna fria

$$\frac{d\delta T_{cl}}{dt} = \frac{[\delta T_{op} - \delta T_{cl}]}{V_{cl} d} W_c \quad (21)$$

3.1.9 Variação temporal da temperatura do *plenum* (região de entrada ou saída) superior do vaso de pressão

$$\frac{d\delta T_{up}}{dt} = \frac{[\delta T_{m1} - \delta T_{up}]}{V_{up} d} W_c \quad (22)$$

3.1.10 Variação temporal da temperatura do *plenum* inferior do vaso de pressão

$$\frac{d\delta T_{lp}}{dt} = \frac{[\delta T_{cl} - \delta T_{lp}]}{V_{lp} d} W_c \quad (23)$$

3.2. Modelagem do Pressurizador

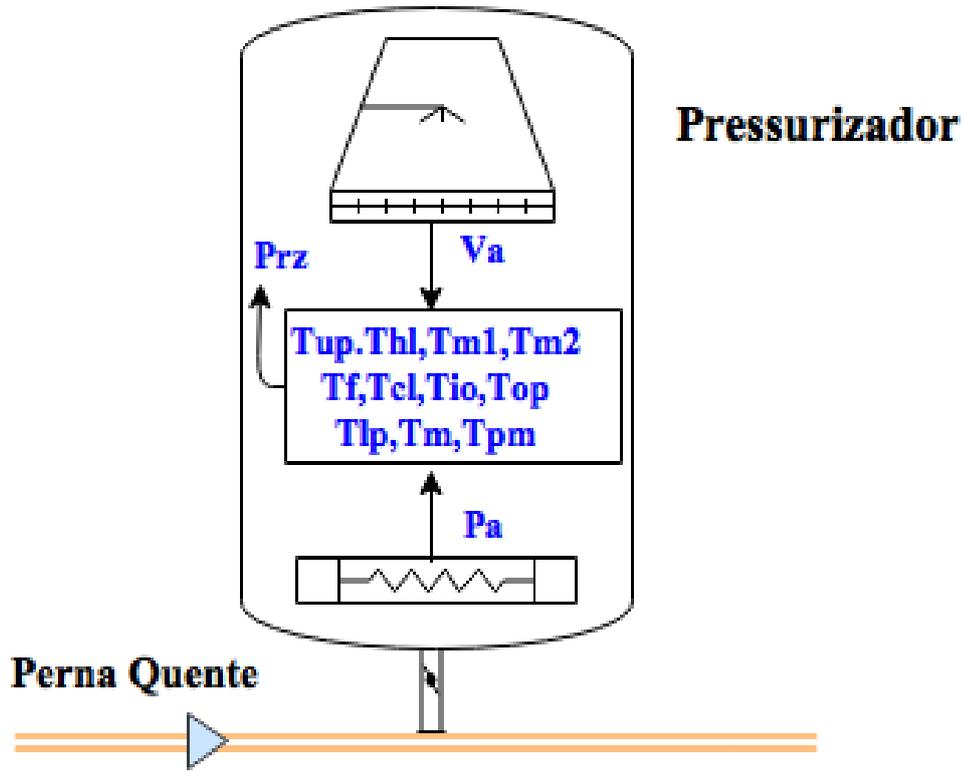


Figura 5 - Modelagem do Pressurizador

3.2.1 Variação temporal da pressão no pressurizador

$$\begin{aligned}
 \frac{d\delta P_{rz}}{dt} = & \frac{Dp}{Cp} P_{rz} + \frac{\delta P_a}{Cp} \\
 & + \frac{Ep}{Cp} \left[\frac{\delta T_{cl} W_c}{d} (\theta_{lp} - \theta_{cl}) + \frac{\delta T_{lp} W_c}{d} (\theta_{cl} - \theta_{lp}) \right. \\
 & + \frac{\delta T_{up} W_c}{d} (\theta_{hl} - \theta_{up}) + \frac{\delta T_{hl} W_c}{d} (\theta_{ip} - \theta_{hl}) \\
 & + \frac{\delta T_{ip} W_c}{d} (\theta_{gst} - \theta_{ip}) + \frac{\delta T_{op} W_c}{d} (\theta_{cl} - \theta_{op}) \\
 & - \delta T_{pm} V_{sgt} \theta_{gst} \left(\frac{h_{pm} A_{pm}}{V_{sgt} d Cp_c} - \frac{W_c}{V_{sgt} d_2} \right) + \frac{\delta T_m h_{pm} A_{pm}}{d Cp_c} \theta_{gst} \\
 & \left. + \frac{\delta T_f h \theta_{c1}}{2 d Cp_c} - \frac{\delta T_{m2} h \theta_{c1}}{2 d Cp_c} + \frac{\delta T_{m1} W_c}{d Cp_c} (\theta_{up} - 2\theta_{c2}) \right] + ValSP \\
 & + \left(\frac{EpSP}{Cp} \right) \delta V_a
 \end{aligned} \tag{24}$$

Sendo:

$$A = \frac{(R * T_s)}{\left(V_{s0} - R V_{s0} d_v \frac{dT_s}{dP_s} \right)} \quad (25)$$

$$B = \frac{P_{s0}}{d(V_{s0} - R V_{s0} d_v \frac{dT_s}{dP_s})} \quad (26)$$

$$Cp = V_{pZR} d \frac{dH_w}{dP} + V_{pZR} d P_{p0} \frac{dv_w}{dP} + \left(\frac{H_{fg} + P_{p0} v_w}{A} \right) + (h_{fg} + P_{p0} v_w) \left[\frac{B}{A(A-B)} \right] \quad (27)$$

$$Dp = V_{pZR} d \left(Cp_c \frac{dT_w}{dP} + P_{p0} \frac{dv_w}{dP} + v_w \right) \quad (28)$$

$$Ep = [h_{wi} - h_{w0} + P_{p0} v_w + (h_{fg} + P_{p0} v_w)] \left[\frac{B}{A(A-B)} \right] \quad (29)$$

$$EpSP = [h_{SP0} - h_{w0} + P_{p0} v_w + (h_{fg} + P_{p0} v_w)] \left[\frac{B}{A(A-B)} \right] \quad (30)$$

$$ValSP = \frac{60G_{sp}}{\tau_{ap}} \quad (31)$$

3.2.2 Variação na potência dos aquecedores do pressurizador (obtida da derivada do controlador PID da pressão com $k_p = K$; $k_I = K/\tau_1$; $k_D = K \tau_2$ e desprezando os termos das derivadas de primeira e segunda ordem por serem bem menores do que o termo proporcional):

$$\frac{d\delta P_a}{dt} = \frac{k}{\tau_{aq}} \delta P_{rz} \quad (32)$$

3.2.3 Vazão dos aspersores do pressurizador

$$\frac{d\delta V_a}{dt} = \frac{G_{sp}}{\tau_{ap}} \delta P_{rz} \quad (33)$$

3.3. Modelagem do Gerador de Vapor

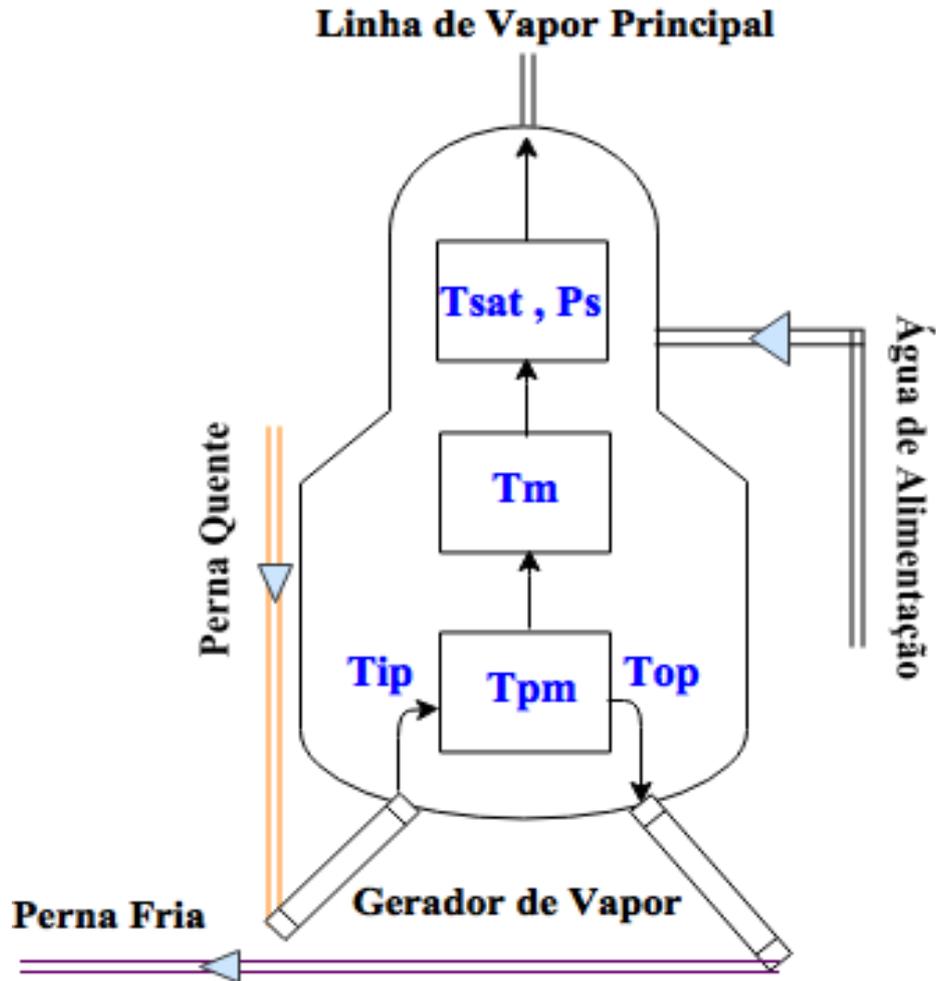


Figura 6 – Modelagem do Gerador de vapor

3.3.1 Variação temporal da temperatura do *plenum* de entrada do gerador de vapor

$$\frac{d\delta T_{ip}}{dt} = \frac{[\delta T_{hi} - \delta T_{ip}]}{V_{ip} d} W_c \quad (34)$$

3.3.2 Variação temporal da temperatura do *plenum* de saída do gerador de vapor

$$\frac{d\delta T_{op}}{dt} = \frac{[\delta T_{pm} - \delta T_{op}]}{V_{op} d} W_c \quad (35)$$

3.3.3 Variação temporal da temperatura da água do circuito primário na região de troca de calor no gerador vapor

$$\frac{d\delta T_{pm}}{dt} = \frac{[\delta T_{ip} - \delta T_{op}]}{V_{sgt} d} W_c + \frac{[\delta T_m - \delta T_{pm}] h_{pm} A_{pm}}{V_{sgt} d C p_c} \quad (36)$$

3.3.4 Variação temporal na temperatura do metal que formam os tubos em U do gerador de vapor

$$\frac{d\delta T_m}{dt} = \frac{[\delta T_{pm} - \delta T_m]}{M_m C_m} h_{pm} A_{pm} + \frac{\left[\frac{dT_{sat}}{dP} \delta P_s - \delta T_m \right] h_{ms} A_{ms}}{M_m C_m} \quad (37)$$

3.3.5 Variação temporal na pressão de vapor que é gerado no gerador de vapor

$$\frac{d\delta P_s}{dt} = \frac{\left\{ h_{ms} A_{ms} \delta T_m - \left(h_{ms} A_{ms} \frac{dT_{sat}}{dP} + W_{s0} \frac{dh_g}{d_p} + cl h_g \right) \delta P_s - h_{FW}' cl \delta P_s \right\} + \left[w_{s0} \delta T_{FW} C p_{c2} - w_{s0} (h_g - h_{FW}') \delta \epsilon / \epsilon_0 \right]}{M_w \frac{dh_f}{d_p} + M_{ss} \frac{dh_g}{d_p} - M_{ss} \frac{dh_{fg}}{d_p} \frac{dv_g}{d_p}} \quad (38)$$

3.4. Sistema de Controle do nível de água no gerador de vapor

O sistema de controle do nível de água no gerador de vapor foi desenvolvido considerando as funções de transferência de acordo com o diagrama em blocos abaixo:

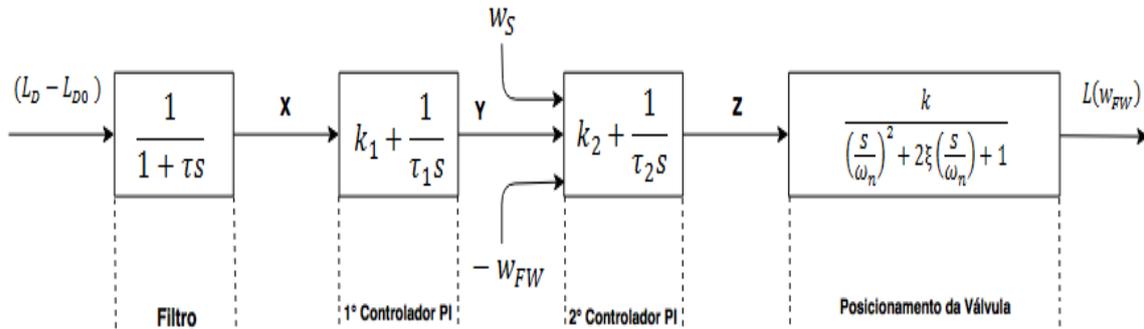


Figura 7 - Representação do sistema de controle de nível no gerador de vapor

O valor da Vazão de vapor W_s é equivalente ao valor do produto da pressão de vapor pelo coeficiente de válvula $C_l \delta P_s$.

3.4.1 Variação do sinal do filtro que representa pequenos atrasos no sinal introduzido pela instrumentação de medida do sistema de controle

$$\frac{d\delta x}{dt} = \frac{1}{\tau} [\delta L_d - \delta x] \quad (39)$$

3.4.2 Nível equivalente de vazão após o controle proporcional e integral (primeiro controlador PI)

$$\frac{d\delta y}{dt} = \frac{k_1}{\tau} [\delta L_d - \delta x] + \frac{1}{\tau_1} \delta x \quad (40)$$

3.4.3 Sinal de erro final após o processo de controle proporcional e integral que é enviado para a válvula da linha de vapor principal (segundo controlador PI)

$$\frac{d\delta z}{dt} = k_2 \left[\frac{1}{\tau_1} - \frac{k_1}{\tau} \right] \delta x + \frac{\delta y}{\tau_2} + \frac{k_1 k_2}{\tau} \delta L_d \quad (41)$$

3.4.4 Variável de estado (posição da válvula) usada na dinâmica (equação diferencial de segunda ordem) da válvula da linha de vapor principal, considerando a frequência natural do sistema ω_n e o amortecimento ξ , bem como a variação no nível (após o segundo controlador PI da equação anterior) e o desequilíbrio entre a vazão da água alimentação e a vazão de vapor do gerador de vapor:

$$\frac{d\delta r}{dt} = k w_n^2 \delta z + \frac{k w_n^2}{\tau_2} \delta v - 2\xi w_n \delta r - w_n^2 \delta W_{FW} + k k_2 w_n^2 [C_l \delta P_s - \delta W_{FW}] \quad (42)$$

3.4.5 Variável de estado usada na dinâmica da válvula da linha de vapor principal, representando a variação no desbalanço entre a vazão da água de alimentação e a vazão de vapor no gerador de vapor:

$$\frac{d\delta v}{dt} = C_l \delta P_s - \delta W_{FW} \quad (43)$$

3.4.6 Variação da vazão mássica da água de alimentação

$$\frac{d\delta W_{FW}}{dt} = \delta r \quad (44)$$

3.4.7 Variação temporal do nível de água no gerador de vapor

$$\frac{d\delta L_d}{dt} = \frac{0.9 C_l \delta P_s}{A_{dw} d} \quad (45)$$

3.5. Modelagem do Circuito Secundário

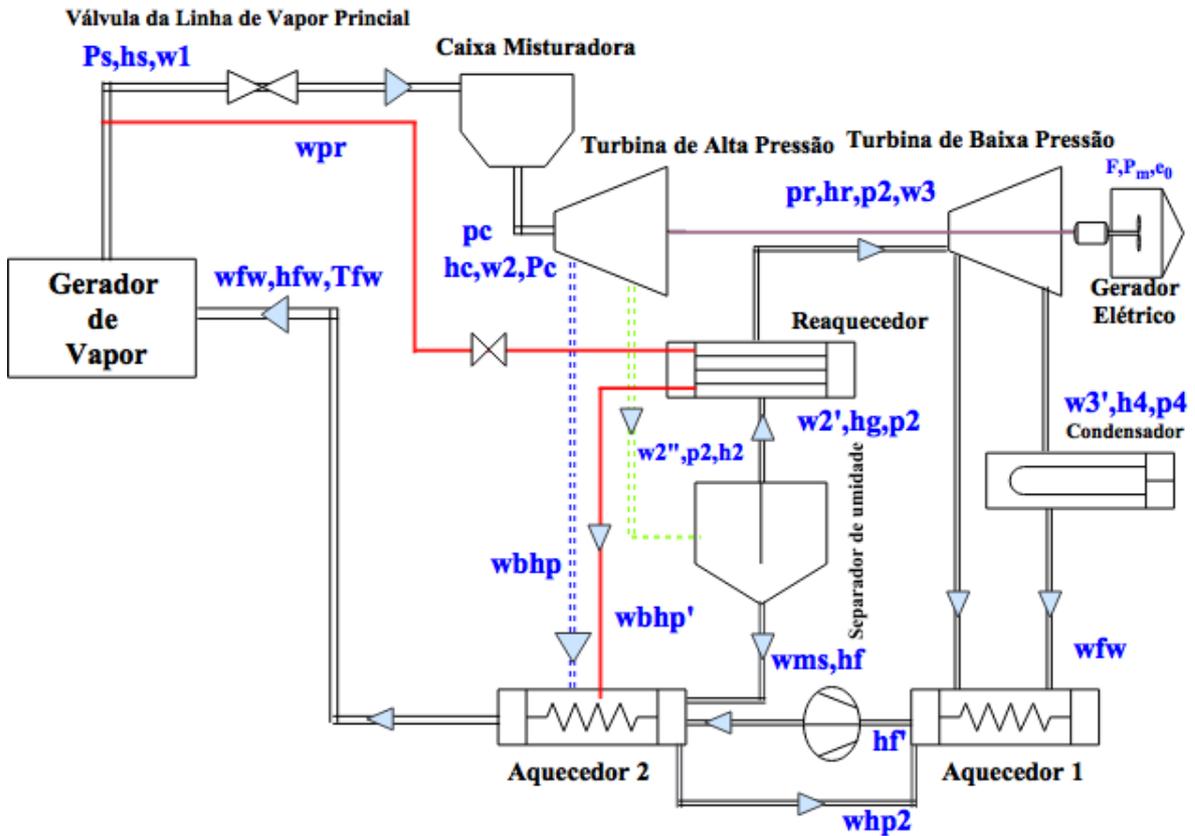


Figura 8 – Modelagem do Circuito Secundário

3.5.1 Variação temporal na densidade de vapor no bocal de entrada da turbina de alta de pressão

$$\frac{d\delta\rho_c}{dt} = \frac{[\delta w_1 - \delta w_2]}{V_c} \quad (46)$$

3.5.2 Variação temporal na entalpia de vapor no bocal de entrada da turbina de alta de pressão

$$\frac{d\delta h_c/h_{co}}{dt} = \frac{1}{1 - \frac{k_1}{g_c} \left[\frac{P_c}{J V_c \rho_c^2 h_c} \delta w_1 + \frac{W_1}{V_c \rho_c h_c} \delta h_s - \frac{P_c}{J V_c \rho_c^2} \delta w_2 - \frac{W_1}{\rho_c V_c} \frac{\delta h_c}{h_{co}} \right]} \quad (47)$$

3.5.3 Variação do fluxo mássico de vapor que entra no separador de umidade

$$\frac{d\delta w_2''/w_{20}''}{dt} = \frac{1}{\tau_{w2}} \left[\frac{1 - k_{BHP}}{w_{20}''} \delta w_2 - \frac{\delta w_2''}{w_{20}''} \right] \quad (48)$$

3.5.4 Variação temporal na densidade de vapor no reaquecedor

$$\frac{d\delta\rho_R}{dt} = \frac{[\delta w'_2 - \delta w_3]}{V_R} \quad (49)$$

3.5.5 Variação temporal na entalpia de vapor no reaquecedor

$$\begin{aligned} \frac{d\delta h_R/h_R}{dt} = & \frac{1}{1 - \frac{k_1}{g_c}} \left[\left(\left[\frac{2}{V_R \rho_R h_R} + \frac{P_R}{J V_R \rho_R^2 h_R} - \frac{1}{V_R \rho_R} \right] \right) \delta w'_2 \right. \\ & \left. + \frac{w_2}{V_R \rho_R h_R} \delta h_2 - \frac{P_R}{J V_R \rho_R^2} \delta w_3 - \frac{w'_2}{V_R \rho_R} \frac{\delta h_R}{h_{R0}} + \frac{\delta Q_R}{V_R \rho_R h_R} \right] \end{aligned} \quad (50)$$

3.5.6 Variação do fluxo mássico de vapor que sai do reaquecedor

$$\frac{d\delta w_{PR}'/w_{PR0}''}{dt} = \frac{1}{\tau_{R1}} \left[\frac{\delta w_{PR}}{w_{PR0}'} - \frac{\delta w_{PR}'}{w_{PR0}''} \right] \quad (51)$$

3.5.7 Calor transferido no reaquecedor (Parte externa aos tubos)

$$\begin{aligned} \frac{d\delta Q_R}{dt} = & \frac{1}{\tau_{R2}} \left[\frac{h_R}{2} (T_S - T_R)(\delta w_{PR} + \delta w_{PR}') \right. \\ & \left. + \frac{h_R}{2} (\delta w_{PR} + \delta w_{PR}')(\delta T_S - \delta T_R) - \delta Q_R \right] \end{aligned} \quad (52)$$

3.5.8 Variação do fluxo mássico de vapor que sai da turbina de baixa pressão

$$\frac{d\delta w'_3/w'_{30}}{dt} = \frac{1}{\tau_{w3}} \left[\frac{1 - k_{BLP}}{w'_{30}} \delta w_3 - \frac{\delta w'_3}{w'_{30}} \right] \quad (53)$$

3.5.9 Variação temporal na entalpia da água de alimentação

$$\begin{aligned} \frac{d\delta h_{FW}'}{dt} = & \frac{H_{FW}}{T_{HI} W_{FW}} [k_{BLP} \delta w_3 + \delta w_{HP2}] - \frac{\delta h_{FW}'}{T_{HI}} - \frac{\delta h_{FW}'}{W_{FW}} \\ & - \frac{d\delta H_{FW}}{T_{HI} W_{FW}^2} (k_{BLP} w_3 + w_{HP2}) \delta W_{FW} \end{aligned} \quad (54)$$

3.5.10 Variação temporal na temperatura da água que sai do aquecedor 2

$$\begin{aligned} \frac{d\delta T_{FW}}{dt} = & \frac{1}{c_{p2} T_{H2}} \left[\frac{H_{FW}}{W_{FW}} (k_{BHP} \delta w_2 + \delta w_{ms} + \delta w_{PR}') \right. \\ & \left. - \frac{H_{FW}}{W_{FW}^2} (k_{BHP} w_2 + w_{ms} + \delta w_{PR}') \delta W_{FW} + \delta h_{FW}' \right] \\ & - \frac{d\delta T_{FW}}{T_{H2}} - \frac{H_{FW}}{W_{FW}} \frac{d\delta W_{FW}}{dt} \end{aligned} \quad (55)$$

3.5.11 Variação do fluxo mássico de água que sai do aquecedor 2 para o aquecedor 1

$$\frac{d\delta w_{HP2}/w_{HP20}}{dt} = \frac{1}{\tau_{HP2} w_{HP20}} [k_{BHP} \delta w_2 + \delta w_{ms} + \delta w_{PR}'] - \frac{1}{\tau_{HP2} w_{HP20}} \frac{d\delta w_{HP2}}{dt} \quad (56)$$

3.6. Sistema de Controle da Válvula da linha de Vapor principal

3.6.1 Variação do coeficiente da válvula de vapor principal

$$\frac{d\delta\epsilon/\epsilon_0}{dt} = -\frac{\delta\epsilon/\epsilon_0}{\tau_g} - \frac{k_g}{\tau_g} \delta P_c - \frac{k_g}{\tau_g R_g} \delta F \quad (57)$$

3.6.2 Variação da potência da rede elétrica

$$\frac{d\delta P_c}{dt} = \left(D + \frac{1}{R_g} \right) \delta F \quad (58)$$

3.6.3 Variação da frequência do gerador elétrico

$$\frac{d\delta F}{dt} = -\frac{D}{M} \delta F + \frac{1}{M} \delta P_m \quad (59)$$

As variáveis:

$$\delta w_1, \delta w_2, \delta w_2', \delta w_3, \delta w_{pr}, \delta P_c, \delta P_R, \delta h_s, \delta T_s, \delta T_r, \delta h_2, \delta P_m, \delta T_{HP}, \delta T_{LP}, \delta h_2', \delta \rho_2'$$

Formam um grupo de equações algébricas lineares que participam do processo de modelagem do circuito secundário. Estas expressões podem ser encontradas no Apêndice A. A formulação acima gera um conjunto de 44 equações diferenciais lineares (primário mais secundário) e 16 equações algébricas. As figuras 9 faz uma representação completa da modelagem dinâmica realizada.

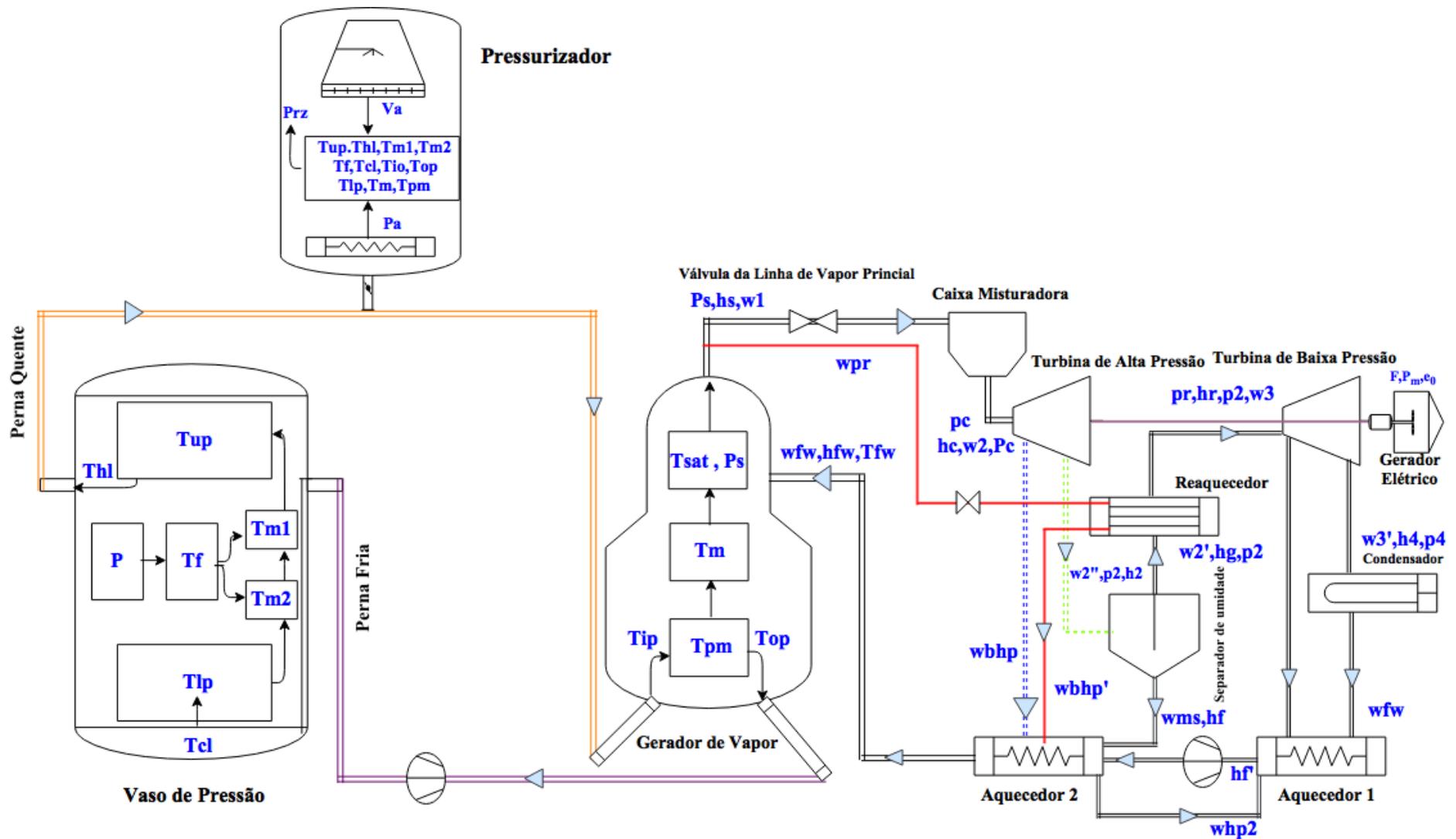


Figura 9 – Representação completa da modelagem dinâmica

4 Critérios de Estabilidade

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos para avaliar a estabilidade de um sistema dinâmico, ou seja, ferramentas que aplicadas ao modelo apresentado no capítulo 3, indicaram se o sistema atua no sentido de convergir ou não para o estado estacionário após uma perturbação dada.

4.1. Espaço de Estados

As equações apresentadas no capítulo 3 podem ser representadas no que comumente é chamado de representação de modelo em espaço de estados, sendo caracterizada da seguinte forma pelas equações (60) e (61).

$$\frac{dx}{dt} = Ax + B\mu \quad (60)$$

$$y = Cx + D\mu \quad (61)$$

Sendo:

x – O vetor que contém as variáveis de estado do sistema;

A – É uma matriz de estado do sistema dinâmico, cujos termos são idênticos aos coeficientes das variáveis de estado nas equações diferenciais lineares;

B – Vetor de perturbação que define qual é a variável de perturbação no sistema associada a uma determinada equação diferencial;

y – Vetor de saída em função das variáveis de estado;

C – Vetor que define a saída em função das instrumentações de medida das variáveis de estado;

D – Vetor ou matriz de incidência direta da perturbação na saída.

μ – Perturbação no sistema

Vale ressaltar que A é uma matriz de ordem (44 x 44) que está de acordo com o fato do modelo apresentado no capítulo 3 possuir 44 equações.

4.2. Redução das equações algébricas

Ao fazer o acoplamento do circuito secundário foi necessário introduzir uma série de equações algébricas descritas no Apêndice A. Estas equações precisam ser retiradas

da matriz de estado dinâmico a fim que se possa obter uma resposta da estabilidade do sistema em função apenas das equações diferenciais que regem a modelagem.

Rescrevendo a equação (60) da seguinte:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} R_{11} & 0 \\ R_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \mu \quad (62)$$

Onde:

R_{11} – Matriz identidade de ordem (44 x 44);

R_{21} – Matriz de zeros de ordem (16 x 44);

x_1 – Vetor que contém as variáveis das equações diferenciais;

x_2 – Vetor que contém as variáveis das equações algébricas;

T_{11} – Matriz que contém os coeficientes das equações diferenciais que multiplicam variáveis de estado;

T_{12} – Matriz que contém os coeficientes das equações diferenciais que multiplicam variáveis algébricas;

T_{21} – Matriz que contém os coeficientes das equações algébricas que multiplicam variáveis de estado das equações diferenciais;

T_{22} – Matriz que contém os coeficientes das equações algébricas que multiplicam variáveis algébricas;

B_1 – Vetor de perturbação das equações diferenciais;

B_2 – Vetor de perturbação das equações algébricas.

Podemos escrever a equação (62) da seguinte forma:

$$R_{11} \frac{dx_1}{dt} - T_{11}x_1 - T_{12}x_2 = B_1\mu \quad (63)$$

$$R_{21} \frac{dx_1}{dt} - T_{21}x_1 - T_{22}x_2 = B_2\mu \quad (64)$$

Multiplicando a equação (63) pela matriz inversa de T_{12} e a equação (64) pela inversa de T_{22} , tem-se:

$$T_{12}^{-1}R_{11} \frac{dx_1}{dt} - T_{12}^{-1}T_{11}x_1 - x_2 = T_{12}^{-1}B_1\mu \quad (65)$$

$$T_{22}^{-1}R_{21} \frac{dx_1}{dt} - T_{22}^{-1}T_{21}x_1 - x_2 = T_{22}^{-1}B_2\mu \quad (66)$$

Subtraindo a equação (66) da equação (65), temos:

$$(T_{12}^{-1}R_{11} - T_{22}^{-1}R_{21}) \frac{dx_1}{dt} - (T_{12}^{-1}T_{11} - T_{22}^{-1}T_{21})x_1 = (T_{12}^{-1}B_1 - T_{22}^{-1}B_2)\mu \quad (67)$$

Multiplicando a equação (67) por T_{12} :

$$(R_{11} - T_{12}T_{22}^{-1}R_{21}) \frac{dx_1}{dt} - (T_{11} - T_{12}T_{22}^{-1}T_{21})x_1 = (B_1 - T_{12}T_{22}^{-1}B_2)\mu \quad (68)$$

Definindo:

$$\alpha = (R_{11} - T_{12}T_{22}^{-1}R_{21}) \quad (69)$$

$$\beta = (T_{11} - T_{12}T_{22}^{-1}T_{21}) \quad (70)$$

$$\gamma = (B_1 - T_{12}T_{22}^{-1}B_2)\mu \quad (71)$$

Pode-se escrever de forma compacta a equação (68):

$$\alpha \frac{dx_1}{dt} - \beta x_1 = \gamma \mu \quad (72)$$

Multiplicando pela inversa da matriz α e reajustando os termos:

$$\frac{dx_1}{dt} = \alpha^{-1}\beta x_1 + \alpha^{-1}\gamma \mu \quad (73)$$

Definindo uma nova matriz A e uma nova matriz B :

$$\frac{dx_1}{dt} = Ax_1 + B\mu \quad \text{sendo: } A = \alpha^{-1}\beta \quad \text{e } B = \alpha^{-1}\gamma \quad (74)$$

Importante notar que a equação (74) é idêntica a equação (60), entretanto tem-se apenas x_1 que é o vetor que representa as variáveis das equações diferenciais, eliminando o efeito das equações algébricas para análise da estabilidade do sistema.

4.3. Função de transferência

De acordo com [9] a função de transferência de um sistema composto por um grupo de equações diferenciais, pode ser definida como a razão da transformada de Laplace das variáveis de saída (função resposta) pela transformada de Laplace da entrada (função perturbação), considerando condições iniciais nulas.

Aplicando a transformada de Laplace no sistema linear definido pelas equações (60) e (61), tem-se:

$$sX(s) = AX(s) + BU(s) \quad (75)$$

$$Y(s) = CX(s) \quad (76)$$

Sendo $D = 0$ para modelagem proposta e $X(S)$ igual a:

$$\begin{aligned} X(s) &= [X_1(s) \ X_2(s) \ X_3(s) \ \dots \ X_n(s)]^T \\ &= \mathcal{L}\{[x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ \dots \ x_n(t)]^T\} \end{aligned} \quad (77)$$

Então é possível fazer:

$$X(s)(sI - A) = BU(s) \quad I = \text{Matriz Identidade } n \times n \quad (78)$$

Definindo uma função de transferência $G(s)$ a partir da definição inicial deste capítulo:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C(sI - A)^{-1}B \quad (79)$$

Se a função de transferência de um modelo é conhecida, a saída ou resposta poderá ser estudada para vários tipos de entrada, o que permite ter o entendimento da natureza do modelo dinâmico implementado [9].

4.4. Critério de estabilidade de Nyquist

O critério de Nyquist é uma ferramenta baseada no estudo de variáveis complexas devido a Cauchy que permite investigar a estabilidade absoluta e relativa de sistemas lineares de malha fechada (sistema retroalimentado) a partir do estudo da função de transferência em malha aberta [14]. Considerando o diagrama em blocos abaixo, defini-se:

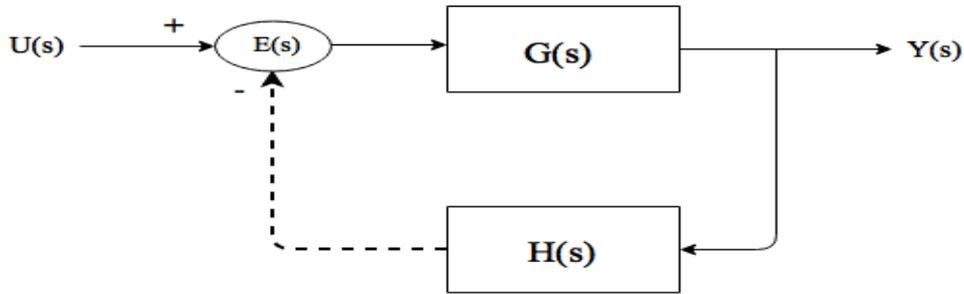


Figura 10 - Diagrama em blocos para um sistema retroalimentado

4.4.1 Função de transferência em malha fechada (*FTMF*)

$$FTMF = \frac{1}{1 + G(s)H(s)} \quad (80)$$

4.4.2 Função de transferência em malha aberta (*FTMA*). Equivalente a desconectar a seta tracejada no diagrama da Figura 10, a saída será equivalente ao produto das funções de transferência

$$FTMA = G(s)H(s) \quad (81)$$

4.4.3 Equação característica (*EC*)

$$EC = 1 + G(s)H(s) \quad (82)$$

A variável $E(s)$ na figura 10, representa o erro entre a saída (resposta) e o valor de entrada (perturbação).

O critério de Nyquist estabelece uma importante relação para o estudo da estabilidade de um sistema, que é dada por:

$$Z = P + N \quad (83)$$

Sendo:

Z = Zeros da equação característica ou polos da função de transferência de malha fechada;

P = Polos da função de transferência em malha aberta no semiplano direito (polos com parte real positiva);

N = Número de envolvimentos no contorno mapeado em torno do ponto -1 no plano complexo $G(s)H(s)$ (rotações no sentido anti-horário são negativas e no sentido horário são positivas).

Um sistema dinâmico é estável quando se tem $Z=0$, para qualquer outro valor de Z , o sistema será instável. A informação inicial sobre o valor de Z é desconhecida, e só pode ser analisada a partir dos valores de P e N [14]. Para o estudo do valor de N é necessário mapear a função de transferência em Malha aberta no domínio dos números complexos. A figura 11 exemplifica este conceito.

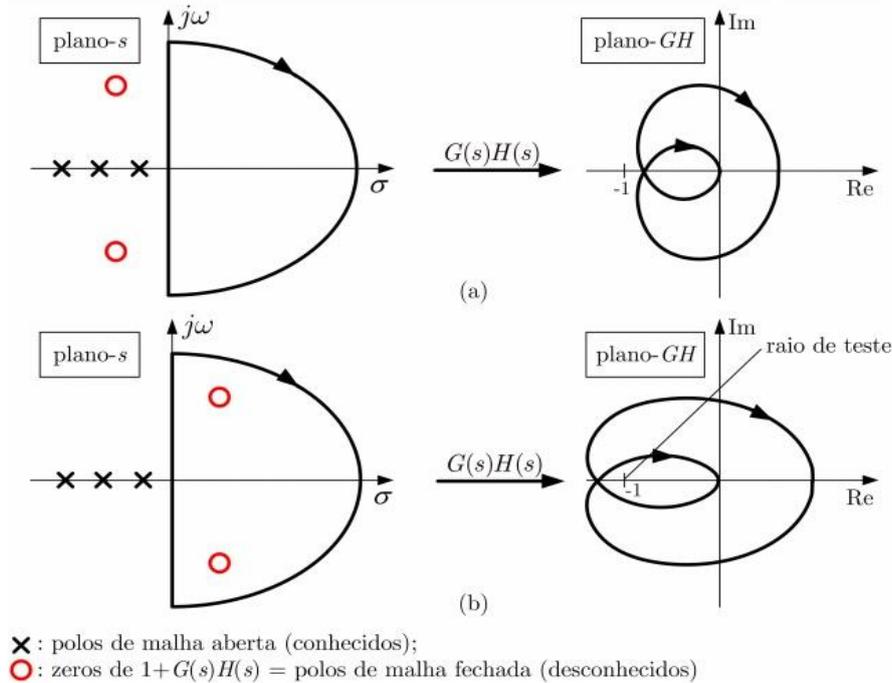


Figura 11 - Critério de Nyquist [14]

Figura 11 (a) representa um sistema estável ($Z = 0$) enquanto a figura 11 (b) indica um sistema que tem instabilidade em seu processo ($Z = 2$). O contorno no semiplano direito de s é comumente chamado de caminho de Nyquist.

O critério de Nyquist para um sistema estável baseado na expressão (83) pode ser enunciado de duas formas [6]:

- 1- Um sistema com retroação é estável se e somente se o contorno no Plano GH não envolver o ponto $(-1,0)$ e não existir polos da função de transferência de malha aberta no semiplano direito do plano s .
- 2- Um sistema com retroação é estável se e somente se o número de circunscrições no sentido anti-horário em $(-1,0)$ for igual ao número de polos da função de transferência de malha aberta no semiplano direito do plano s .

4.5. Critério de Estabilidade de Bode

Uma segunda forma de estudar a estabilidade de um processo dinâmico é através da sua resposta no domínio da frequência, este estudo é estabelecido através da aplicação do diagrama de bode.

Para estabelecer uma resposta no domínio da frequência, faz-se necessário entender as relações entre a transformada de Laplace e a transformada de Fourier, para tal segue as expressões abaixo:

$$\text{Transformada de Laplace} \rightarrow G(s) = \int_0^{+\infty} g(t)e^{-st} dt \quad (84)$$

$$\text{Transformada de Fourier} \rightarrow G(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t)e^{-2\pi fjt} dt \quad (85)$$

Sendo s um número complexo da seguinte forma:

$$s = \sigma + j\omega \quad e \quad \omega = 2\pi f \quad (86)$$

Substituindo s conforme a expressão acima na função de transferência $G(s)$, é possível obter uma função de transferência $G(j\omega)$ que será representada por um número complexo. A partir deste número complexo de forma geral $(a + jb)$ é possível obter o módulo e a fase deste número da seguinte maneira:

$$\text{Módulo} \rightarrow |G(j\omega)| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{Fase} \rightarrow \phi = \tan^{-1} \frac{b}{a} \quad (87)$$

A partir do módulo é então calculado o ganho logarítmico da seguinte maneira:

$$\text{Ganho logarítmico (dB)} = 20 \log_{10} |G(j\omega)| \quad (88)$$

Para obter-se o diagrama de bode basta desenhar o gráfico dos valores de ganho logarítmico e de fase para diversos valores de frequência. A estabilidade é feita considerando a frequência na qual o ganho logarítmico zero cruza o gráfico de ganho logarítmico. Para esta frequência é verificado o valor da fase no gráfico dos valores de fase, caso ela seja maior que -180 graus, o sistema dinâmico tem comportamento estável, caso contrário o sistema é instável. O valor de -180 graus refere-se exatamente ao ponto (-1,0) mostrando aqui uma equivalência entre os critérios de estabilidade de Nyquist e Bode. A figura 12 apresenta dois resultados, sendo (a) um sistema estável e (b) um sistema com instabilidade em seu processo dinâmico.

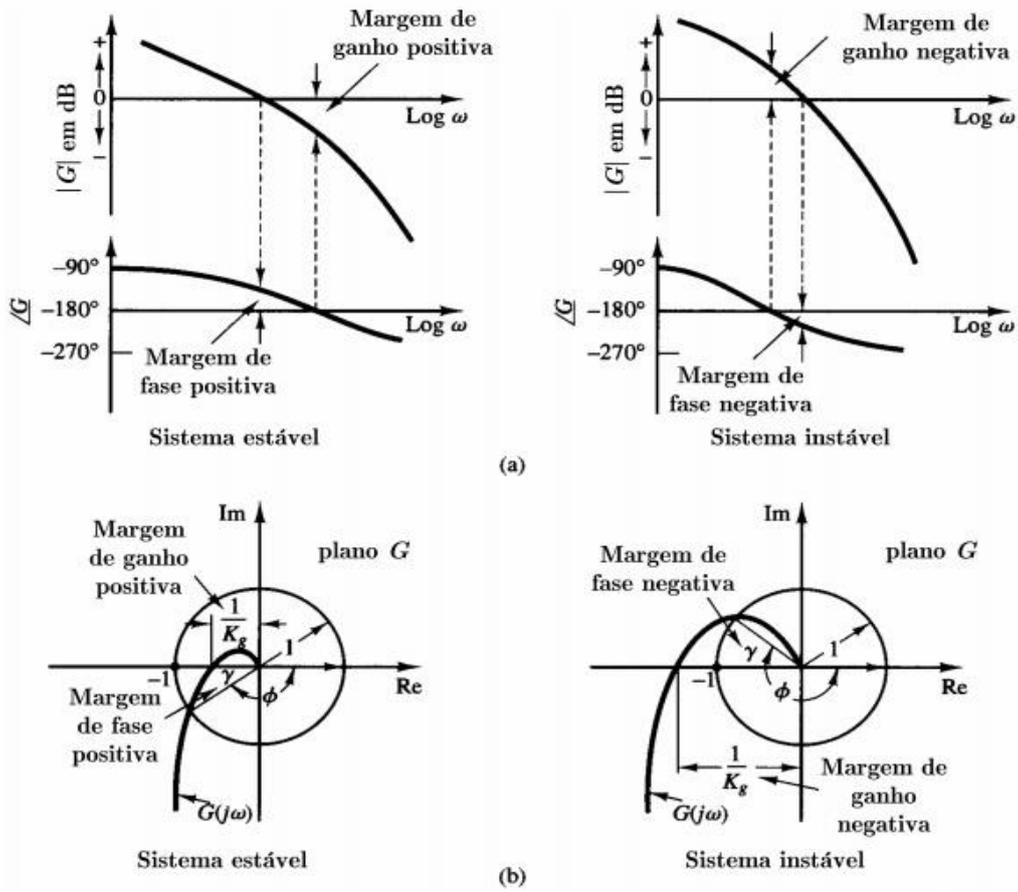


Figura 12 - Critério de Estabilidade de Bode [14]

5. Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações realizadas para usina nuclear de Angra 2 e para a usina de H.B. Robinson, posteriormente é feita uma discussão dos gráficos gerados no sentido de avaliar a estabilidade do sistema, bem como os princípios físicos associados aos resultados obtidos.

O código desenvolvido neste trabalho foi feito através do @Scilab que está disponível em [15].

A representação em espaço de estados foi utilizada apenas para avaliar a estabilidade do sistema. O método para resolver as equações propostas no capítulo 3 é feito através da função ODE do Scilab que escolhe automaticamente entre o método preditor-corretor não-rígido de Adams e a Fórmula de Diferenciação Retroativa (FDR) rígida. Ele utiliza o método não rígido inicialmente e monitora os dados para decidir qual método utilizar [15]. A condição inicial para cada equação diferencial realiza o papel da perturbação dada ao sistema, sendo escolhida de acordo com interesse em que se espera avaliar a natureza comportamental do modelo. O processamento dos dados foi feito por um período de 100 segundos, com passo de cálculo de 0.25 segundos.

5.1. Simulação Dinâmica de Angra 2

Para testar o código feito, foi realizada uma simulação semelhante em [16] só que trabalhando com unidades no sistema internacional de medidas e uma perturbação menos agressiva (pequena variação) na temperatura da perna quente. As condições iniciais utilizadas foram as seguintes:

$$\delta P = 0.106 \quad \delta T_{hl} = 2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \delta P_s = 69430 \text{ Pa} \quad \rho_{ext} = \left[10 \sin\left(\frac{t}{10}\right) e^{\frac{-t}{250}} \right] \Lambda \quad (89)$$

O ρ_{ext} permite avaliar o comportamento do sistema para uma função oscilatória (sin) com um amortecimento exponencial, representando uma perturbação na potência nuclear, advinda da demanda da rede elétrica externa.

Algumas variáveis como: potência, temperatura do plenum superior do vaso de pressão, temperatura da perna fria, fluxo mássico na saída da turbina de baixa pressão, coeficiente da válvula de vapor, potência na rede elétrica e vazão da água de alimentação foram calculadas para um intervalo de 800 segundos para demonstrar que as curvas oscilaram para o estado estacionário. A seguir são apresentados os resultados gráficos.

5.1.1. Vaso de Pressão do Reator

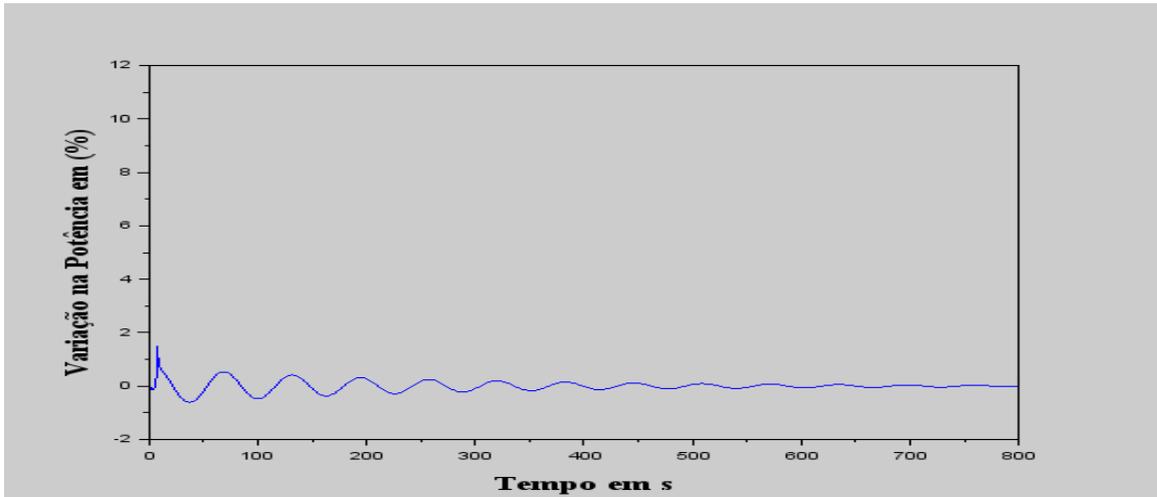


Figura 13 - Variação da potência nuclear

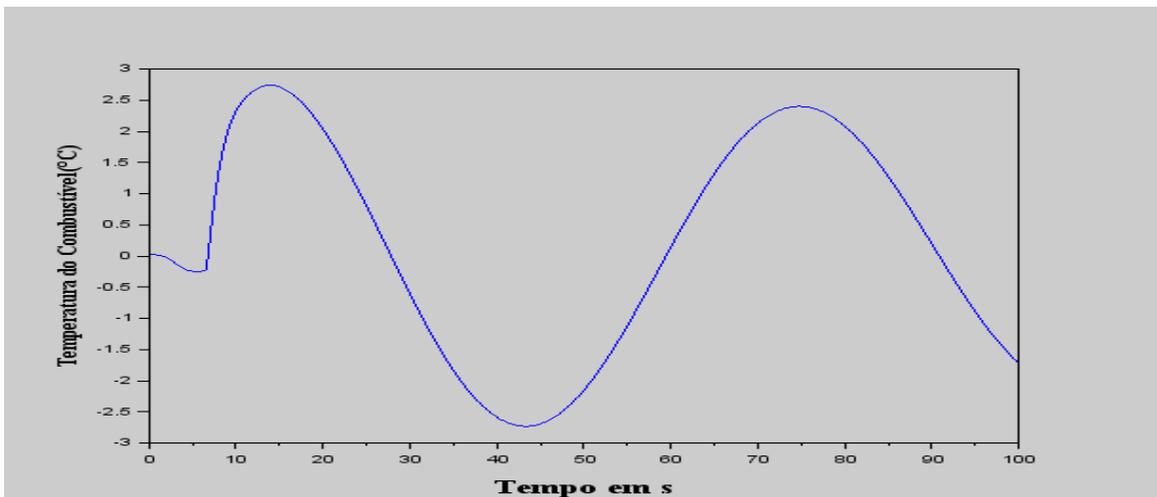


Figura 14 – Variação da temperatura do combustível

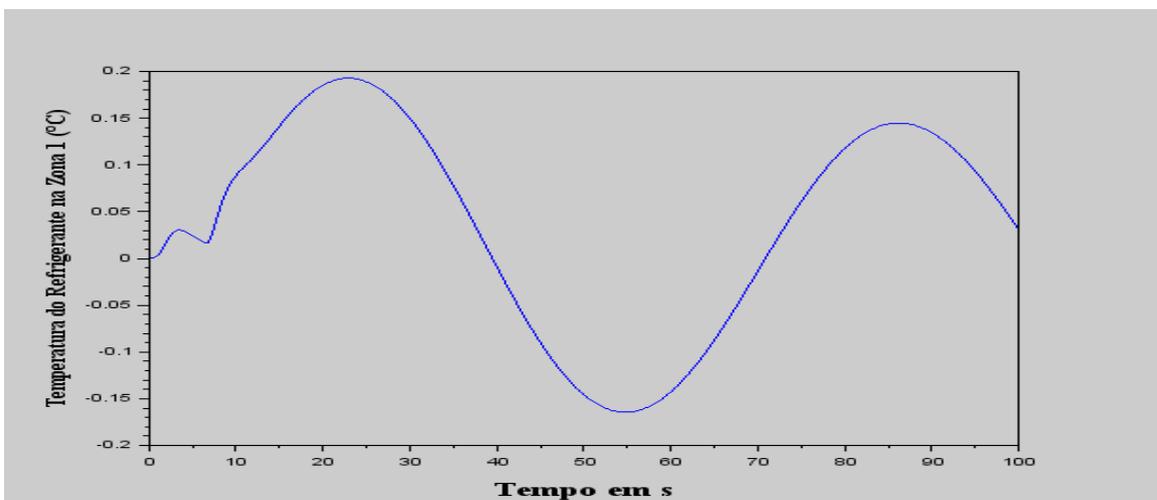


Figura 15 - Variação da temperatura do refrigerante zona 1

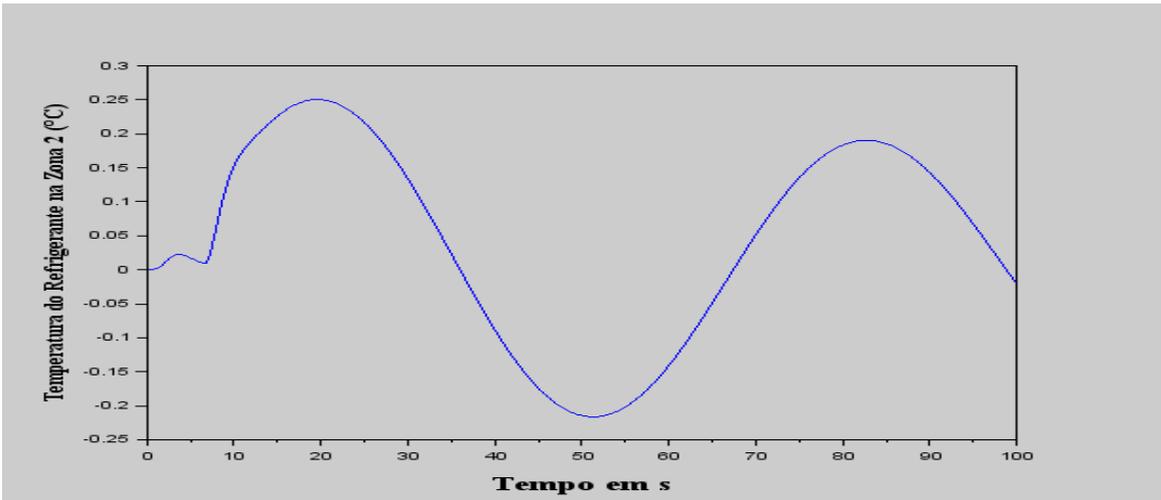


Figura 16 - Variação da temperatura do refrigerante zona 2

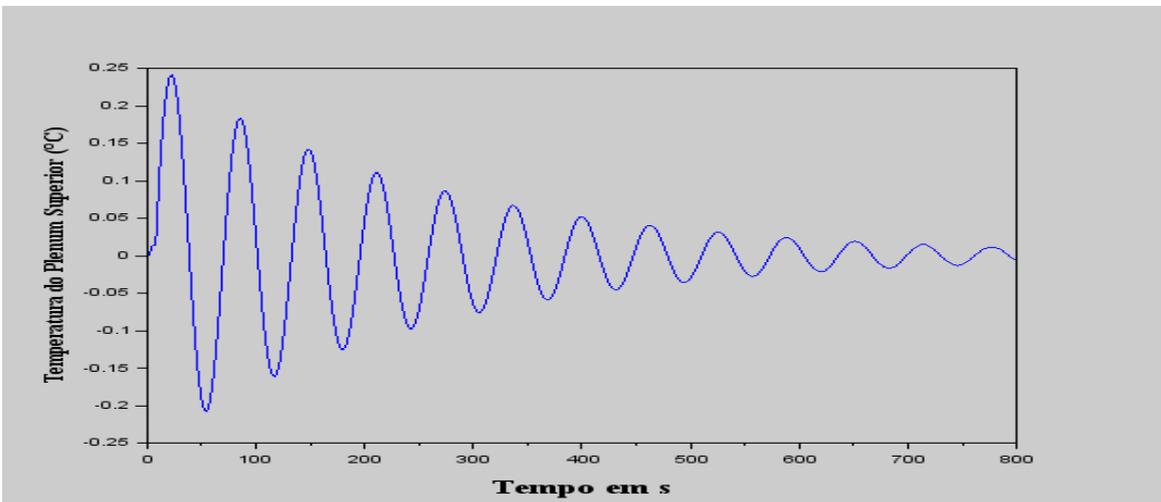


Figura 17 - Variação da temperatura do *plenum* superior do vaso de pressão

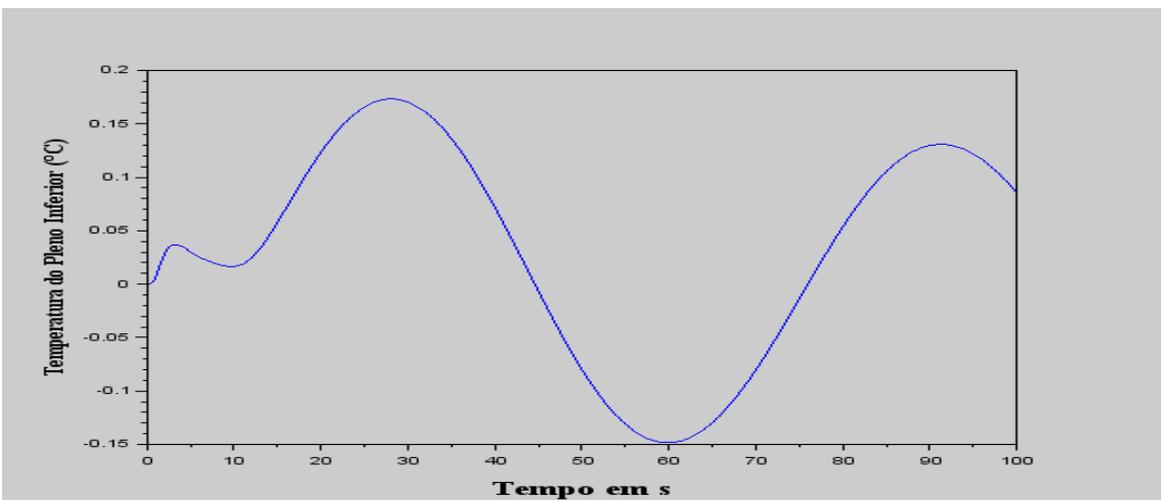


Figura 18 - Variação da temperatura do *plenum* inferior do vaso de pressão

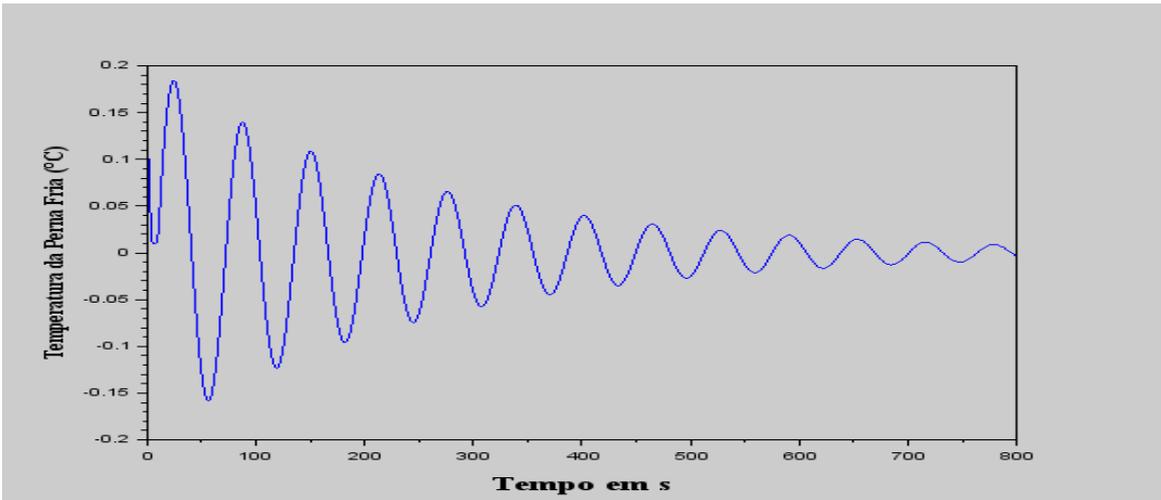


Figura 19 - Variação da temperatura na perna fria

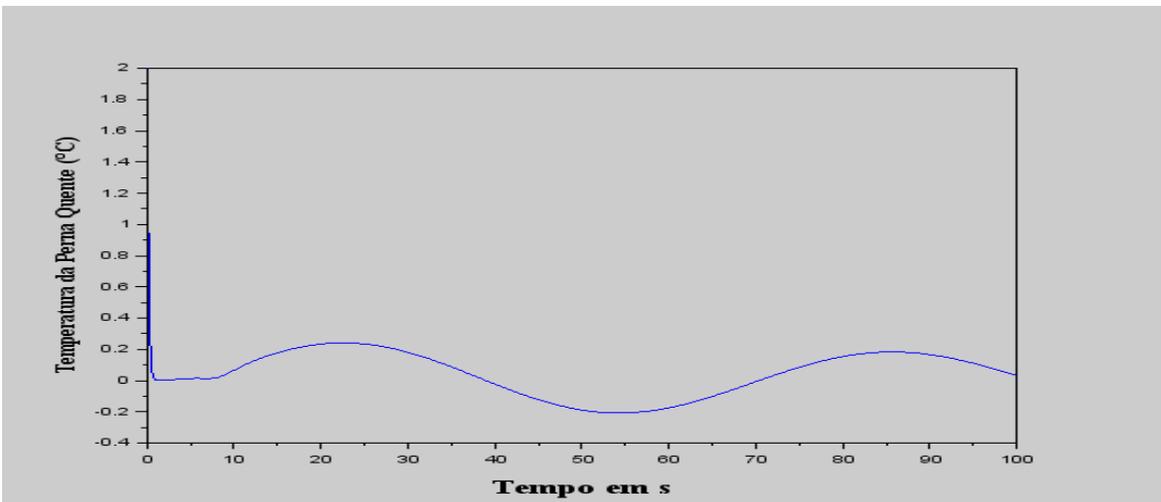


Figura 20 - Variação da temperatura na perna quente

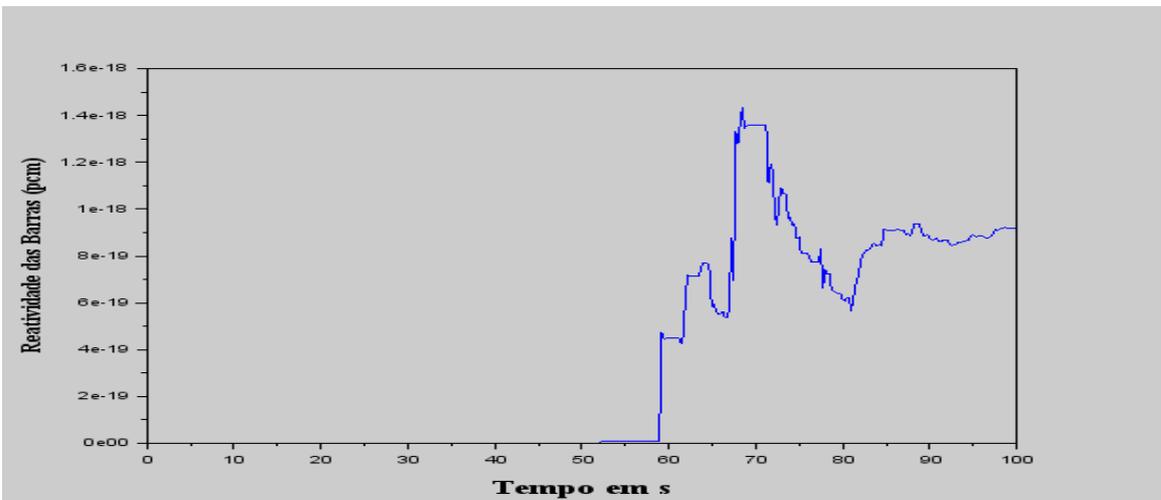


Figura 21 - Reatividade inserida pelas barras de controle

5.1.2. Pressurizador

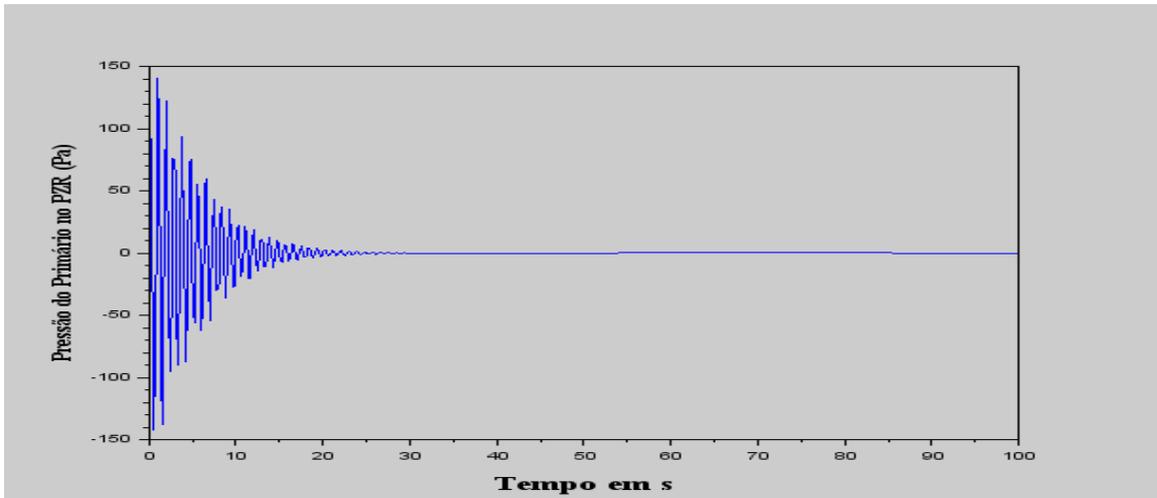


Figura 22 - Variação da pressão no primário no pressurizador

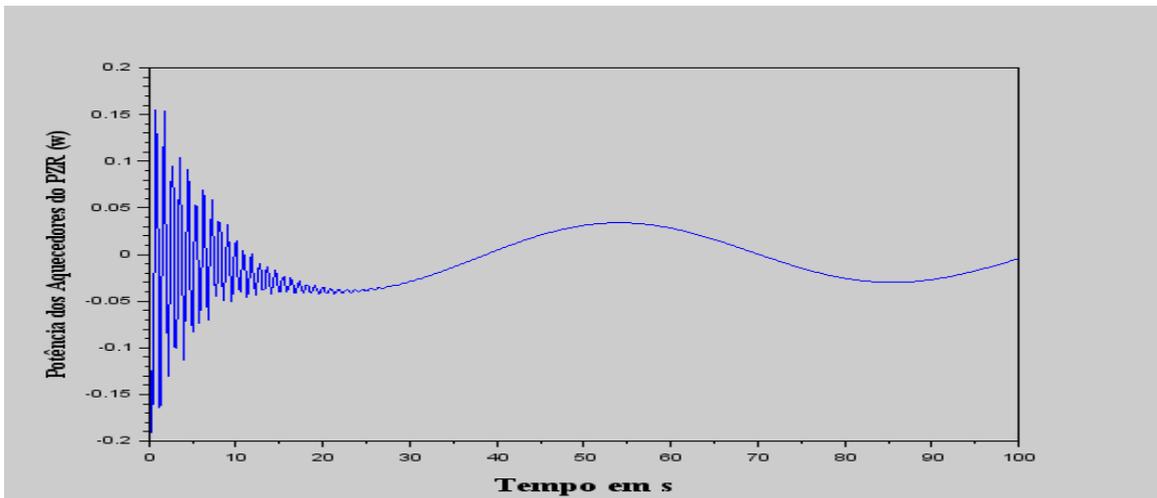


Figura 23 - Variação na potência dos aquecedores

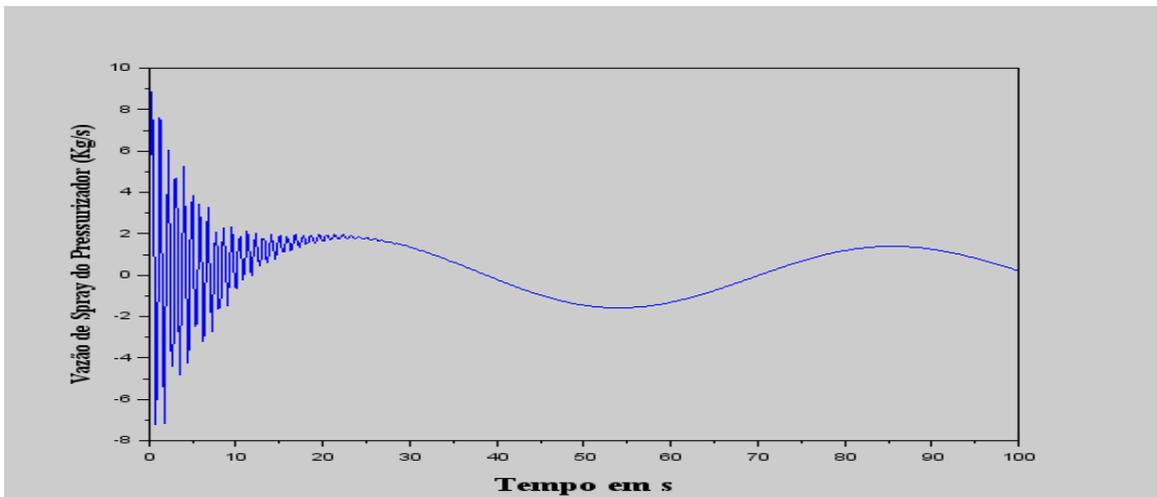


Figura 24 - Variação na vazão dos aspersores do pressurizador

5.1.3. Gerador de Vapor

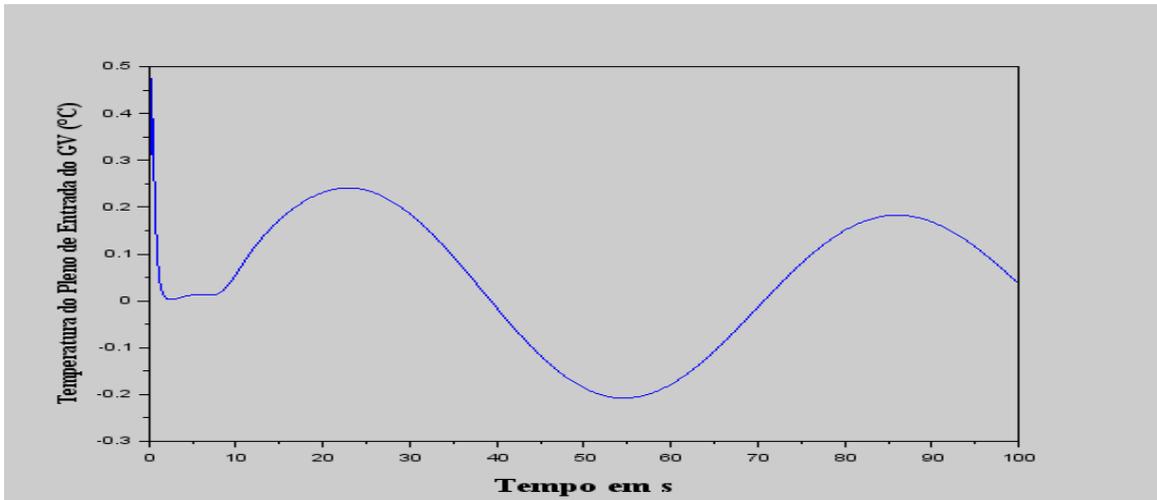


Figura 25 - Variação da temperatura do *plenum* de entrada do GV

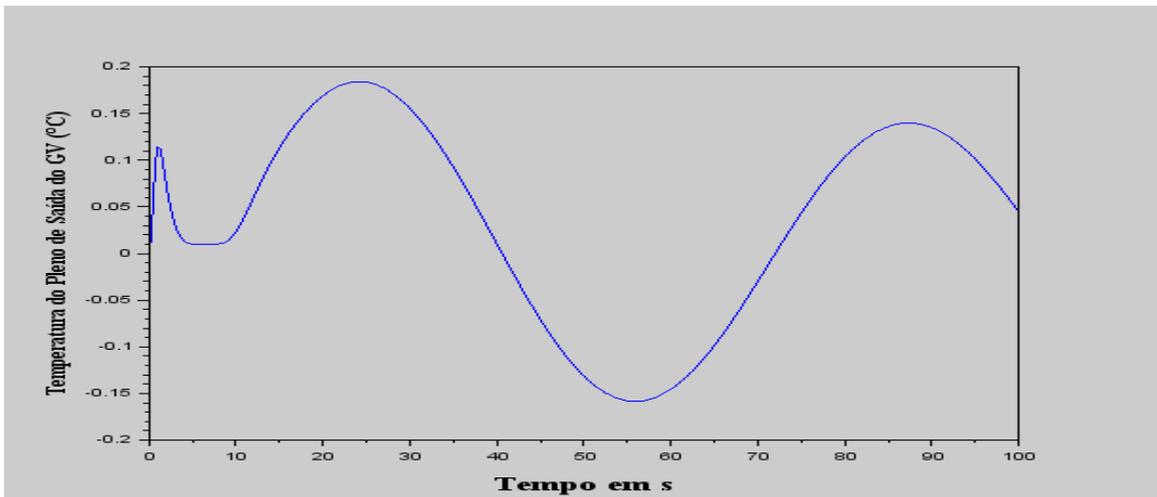


Figura 26 - Variação da temperatura do *plenum* de saída do GV

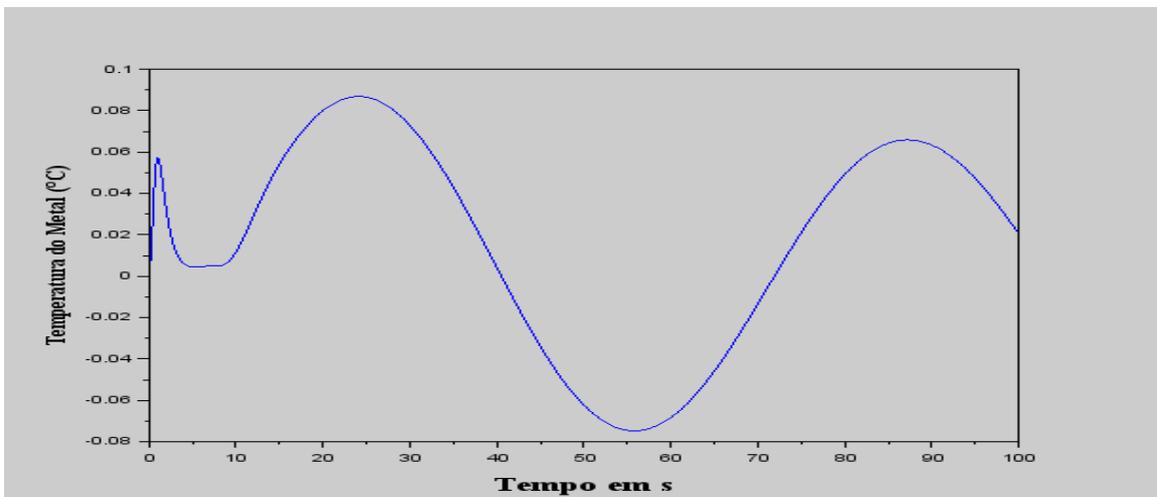


Figura 27 - Variação na temperatura dos tubos de metal do GV

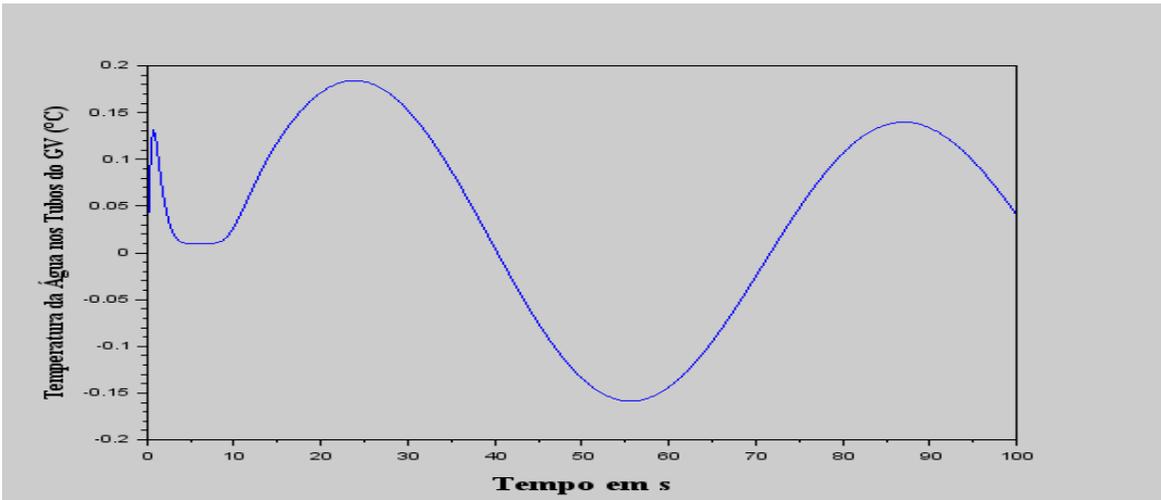


Figura 28 - Variação na temperatura da água dentro dos tubos do GV

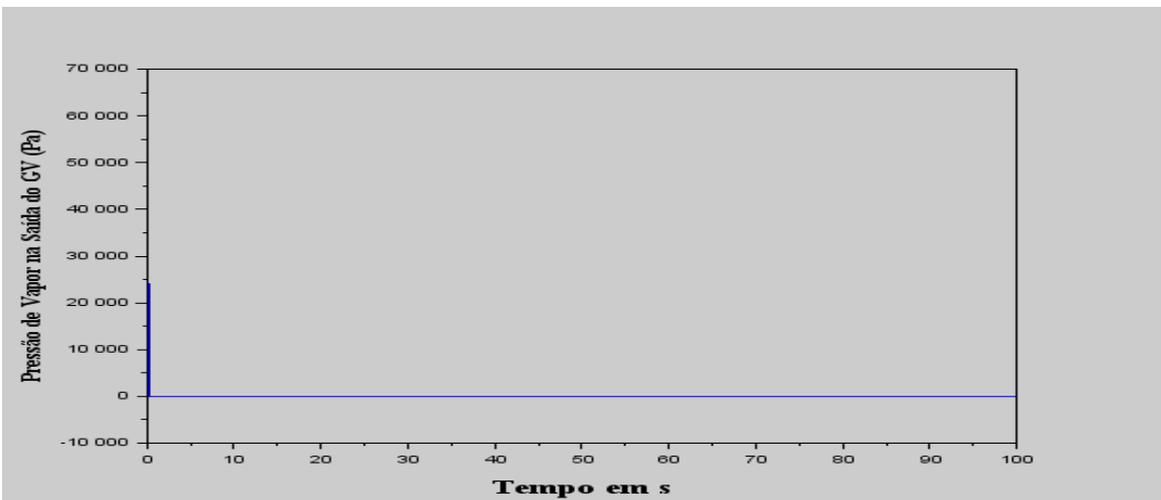


Figura 29 - Variação na pressão de vapor que sai do GV

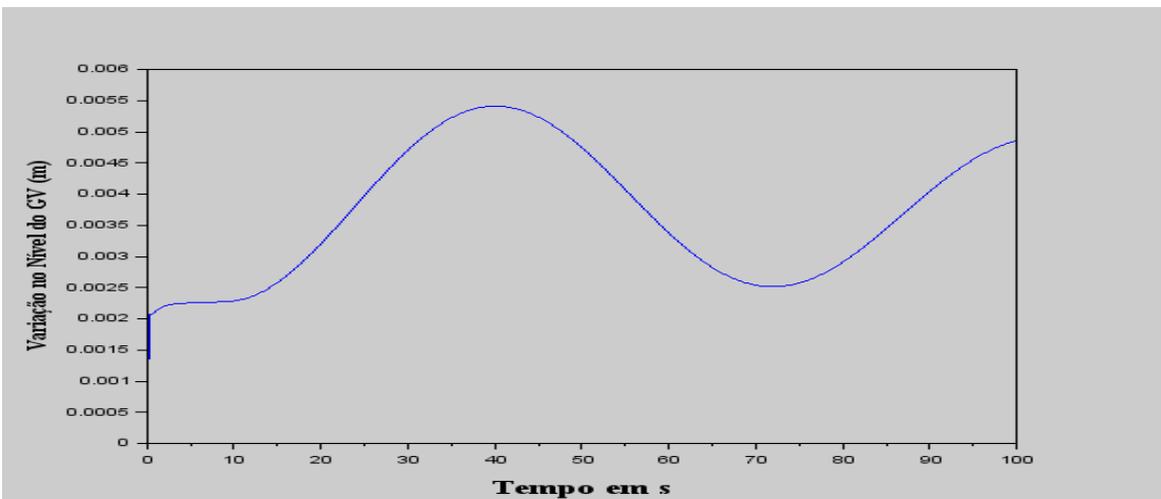


Figura 30 - Variação no nível de água dentro do GV

5.1.4. Circuito Secundário

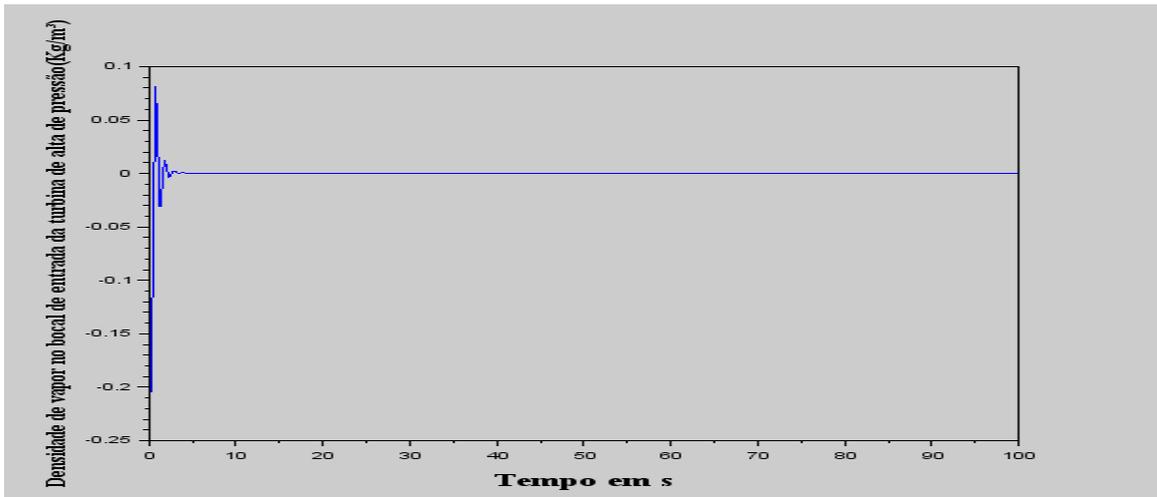


Figura 31 – Variação na densidade de vapor no bocal de entrada da turbina de alta pressão

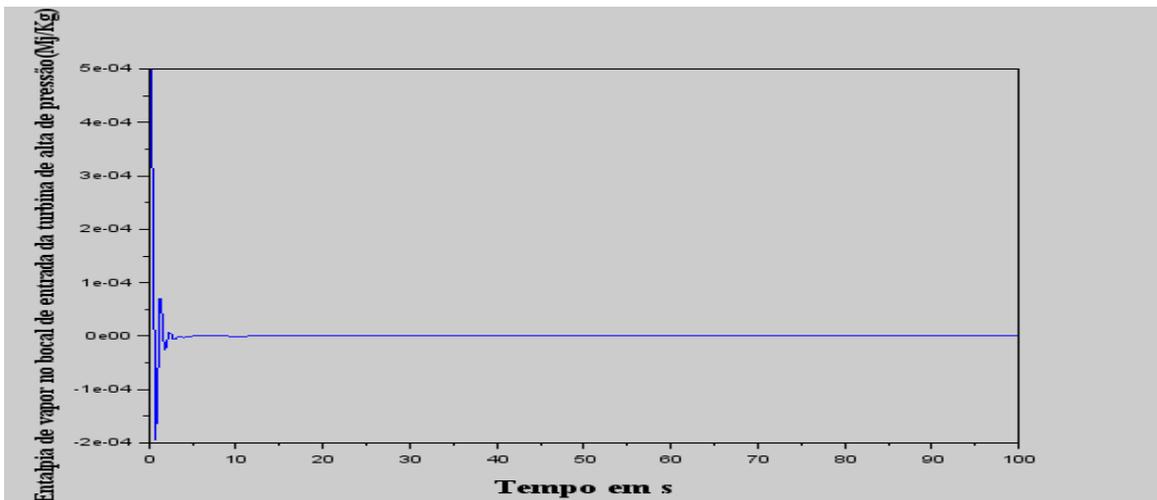


Figura 32 - Variação na entalpia de vapor no bocal de entrada da turbina de alta pressão

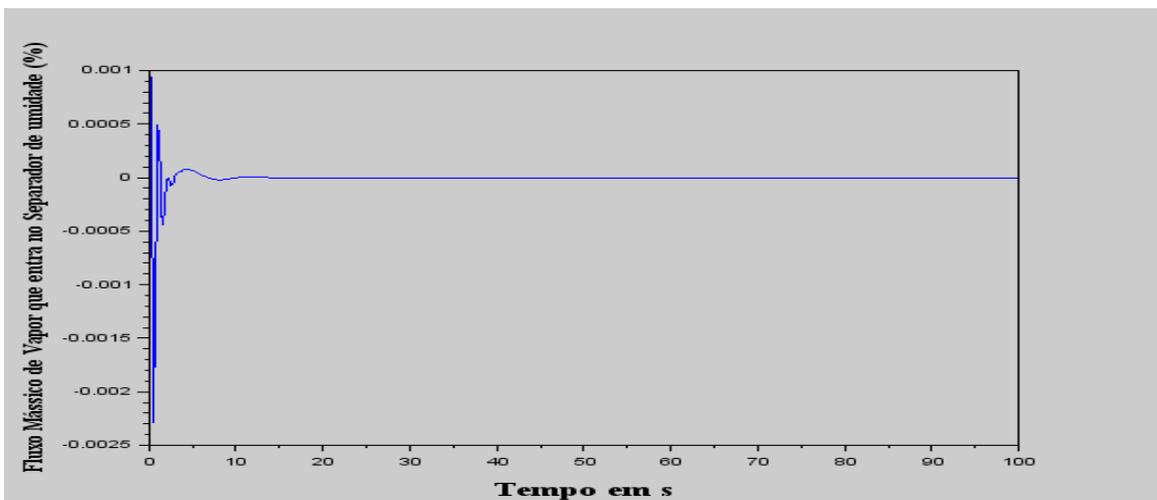


Figura 33 - Variação no fluxo mássico de vapor que entra no separador de umidade

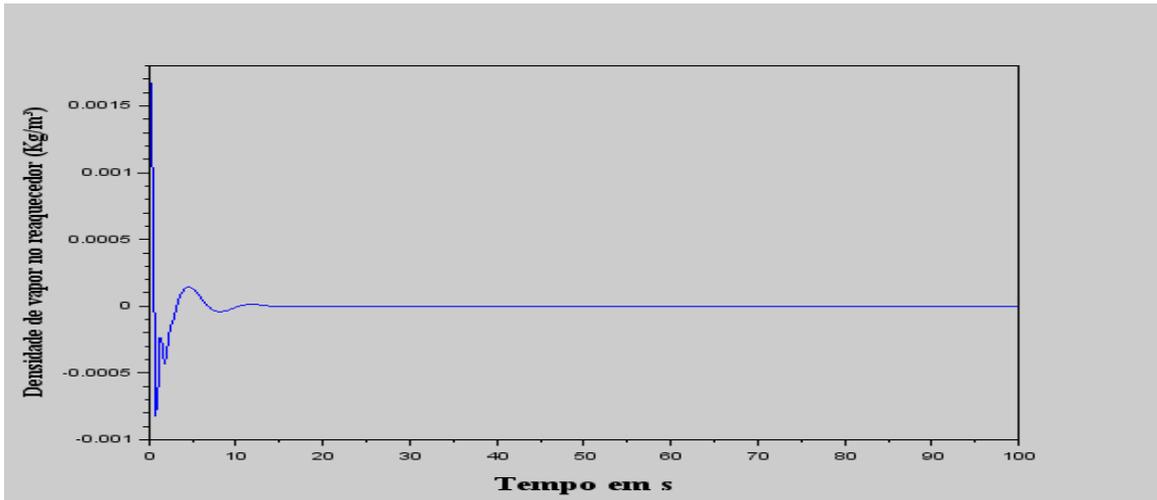


Figura 34 - Variação na densidade de vapor no reaquecedor

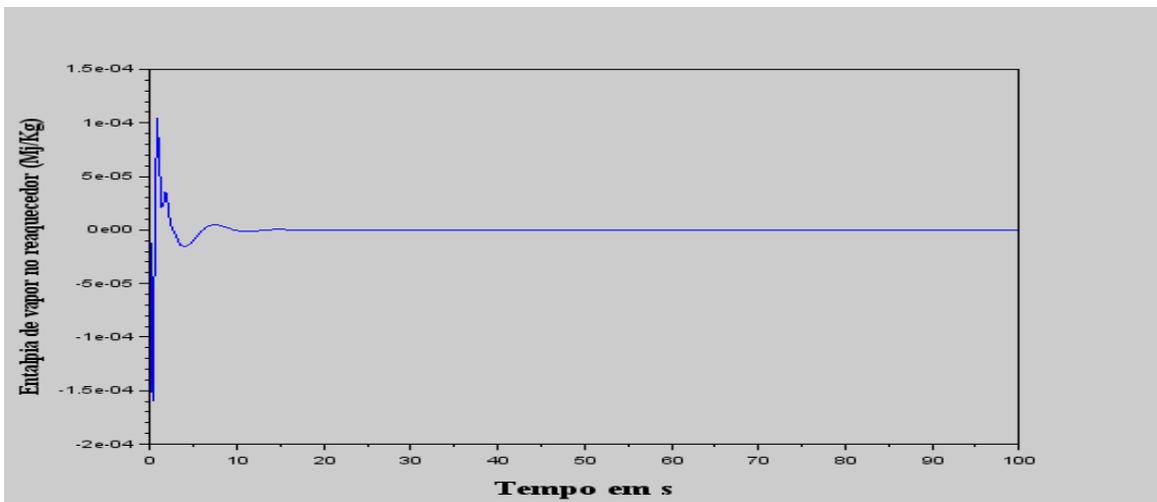


Figura 35 - Variação na entalpia de vapor no reaquecedor

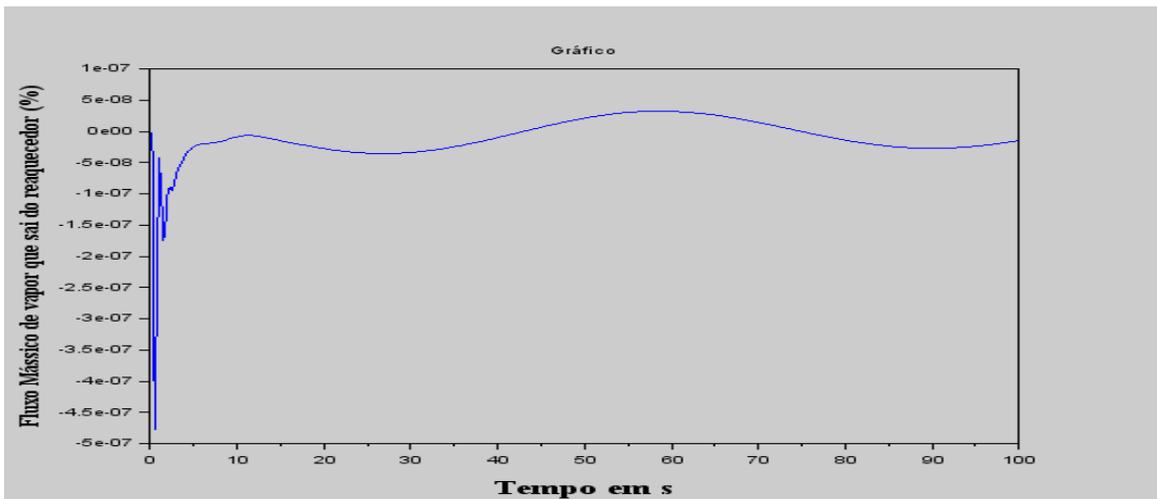


Figura 36 - Variação no fluxo mássico de vapor que sai do reaquecedor

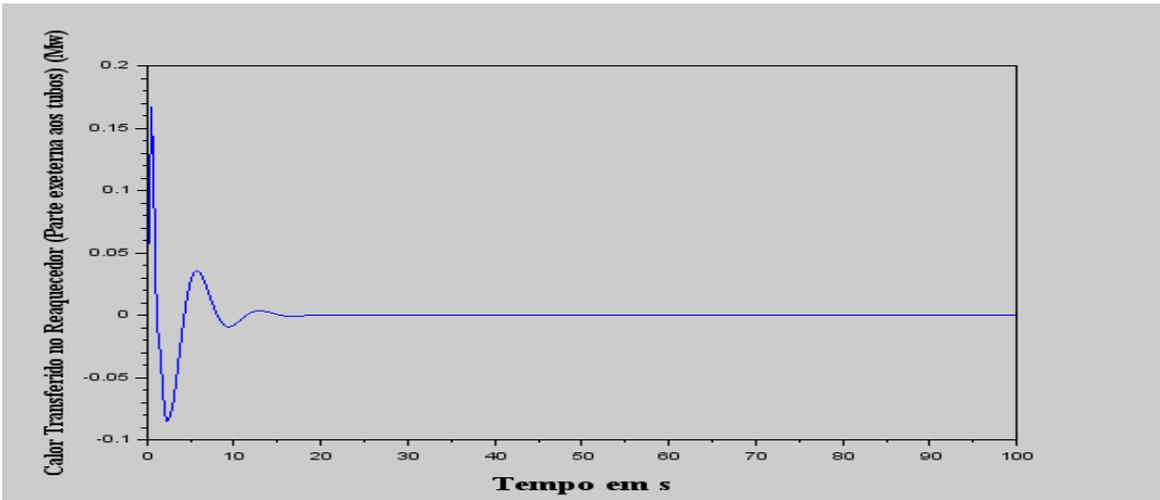


Figura 37 - Variação do calor transferido no reaquecedor (Parte externa aos tubos)

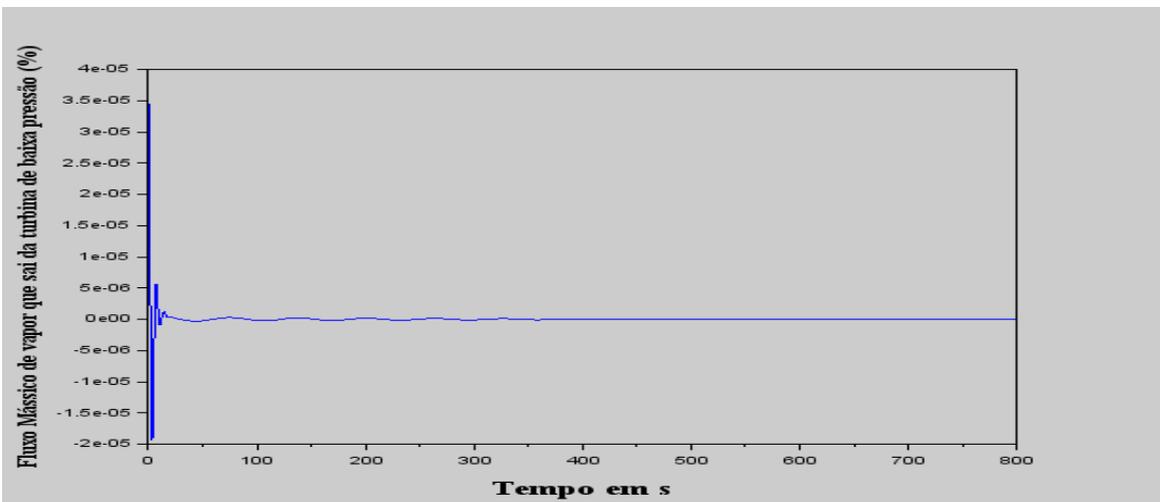


Figura 38 - Variação do fluxo mássico que sai da turbina de baixa pressão

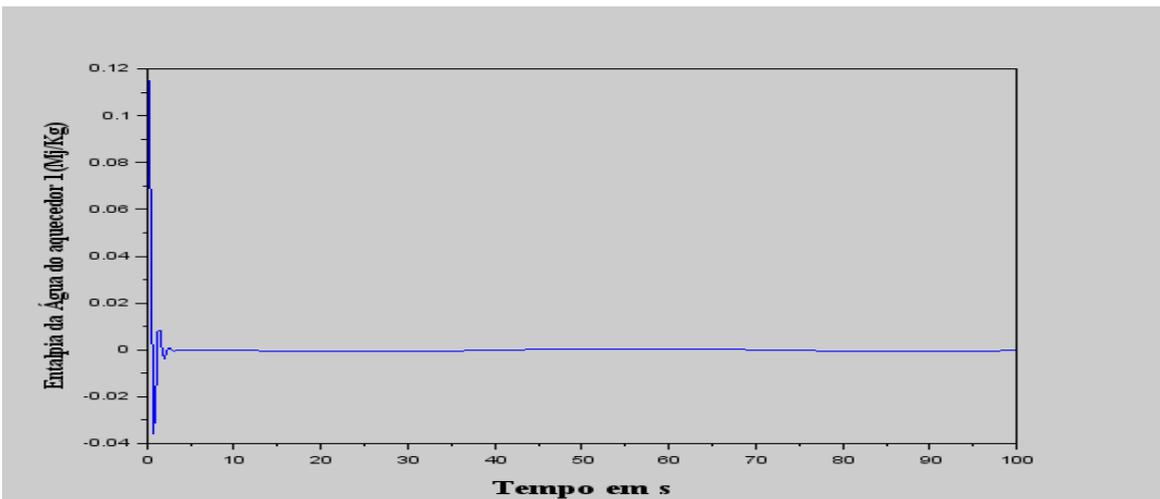


Figura 39 - Variação na entalpia da água do aquecedor 1

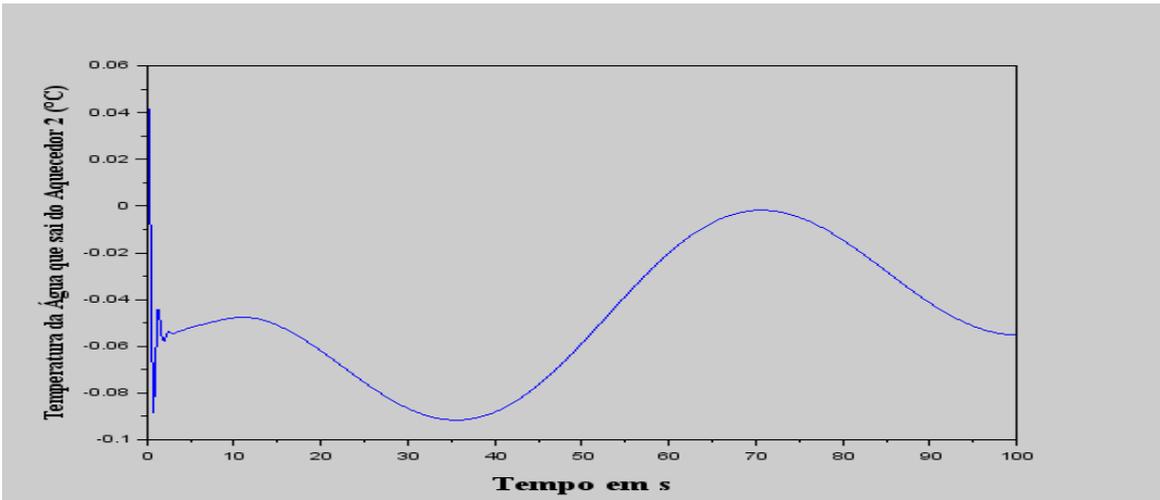


Figura 40 - Variação na temperatura da água que sai do aquecedor 2

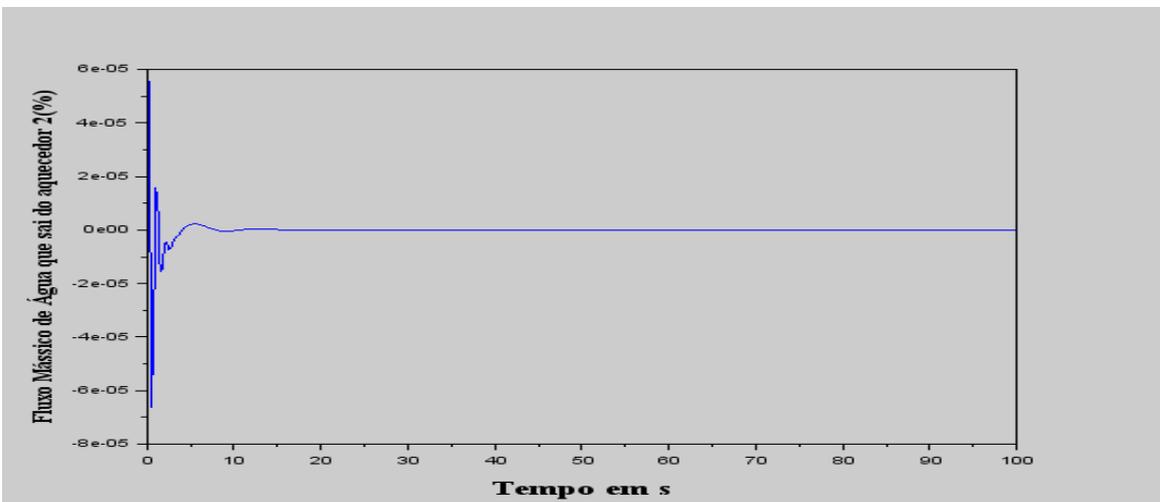


Figura 41 - Variação no fluxo mássico que sai do aquecedor 2

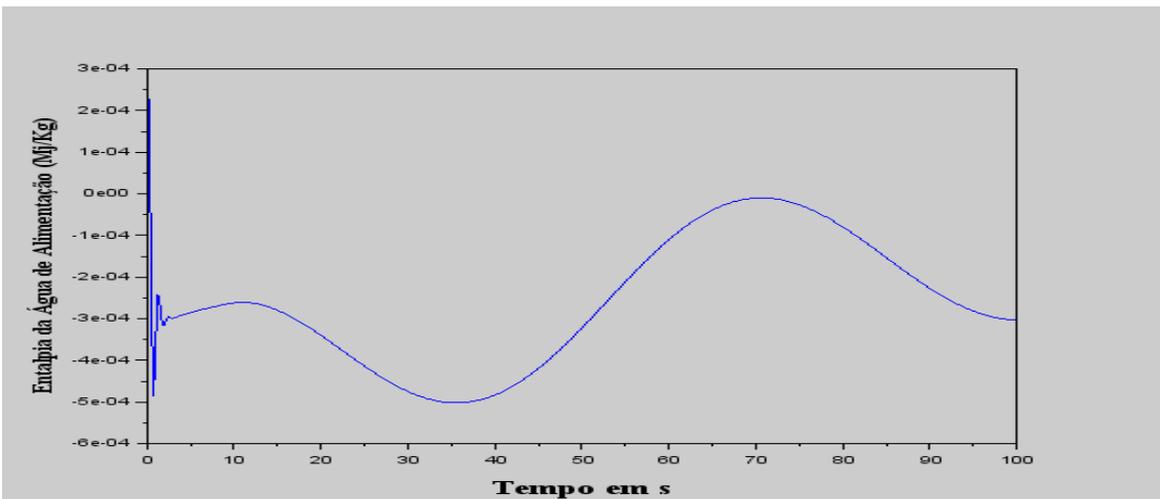


Figura 42 - Variação na entalpia da água de alimentação

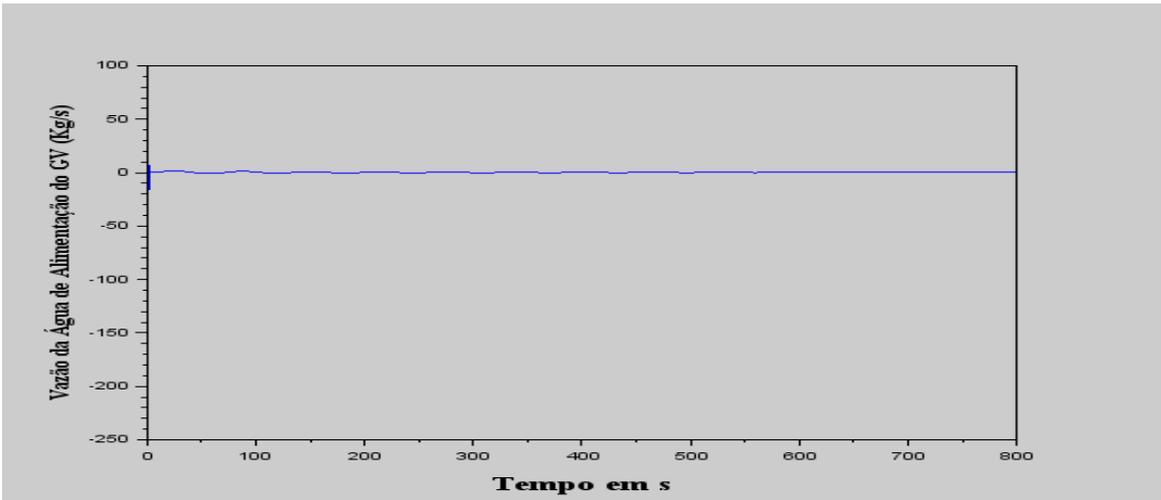


Figura 43 - Variação na vazão da água de alimentação

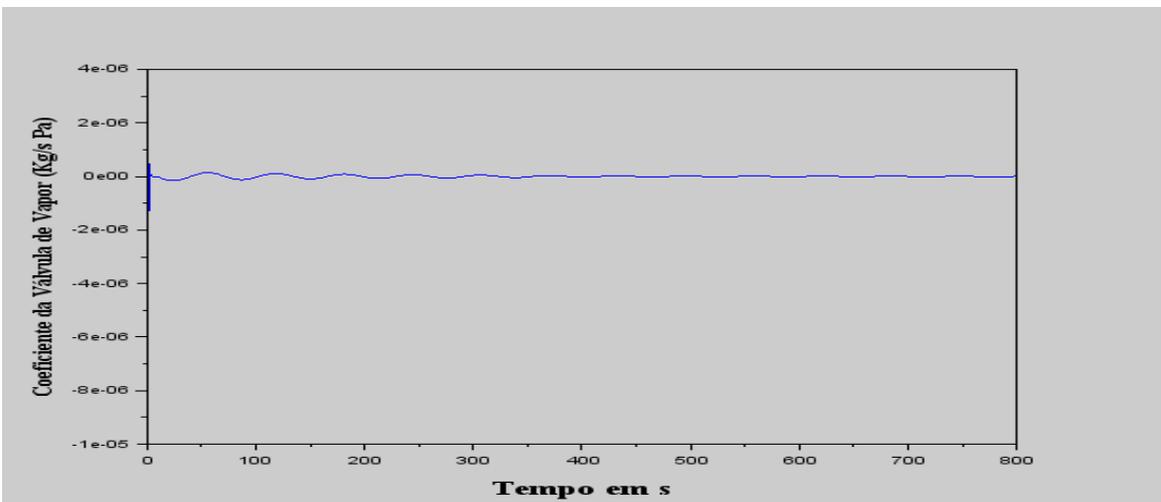


Figura 44 - Variação no coeficiente da válvula de vapor

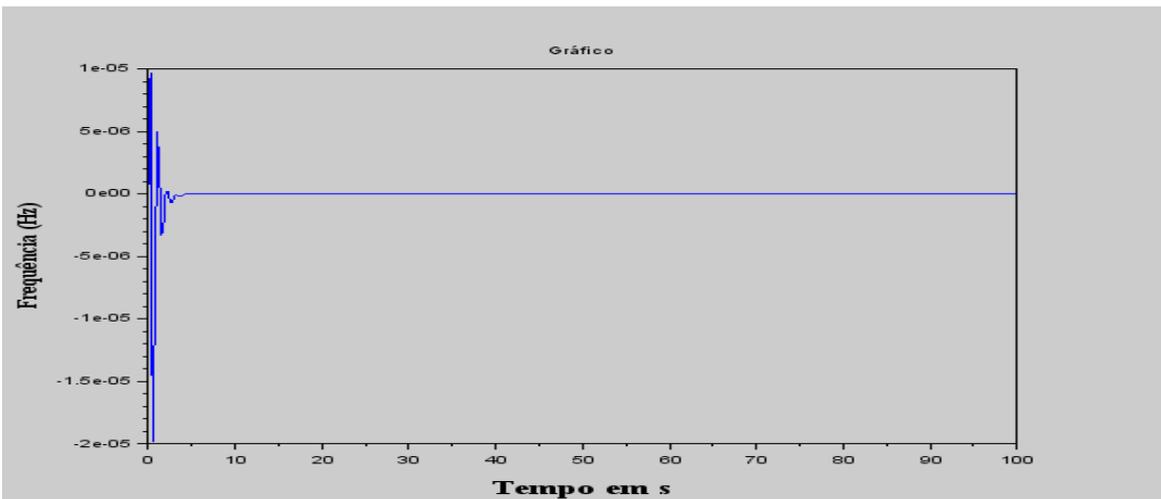


Figura 45 - Variação na frequência de rotação do gerador elétrico

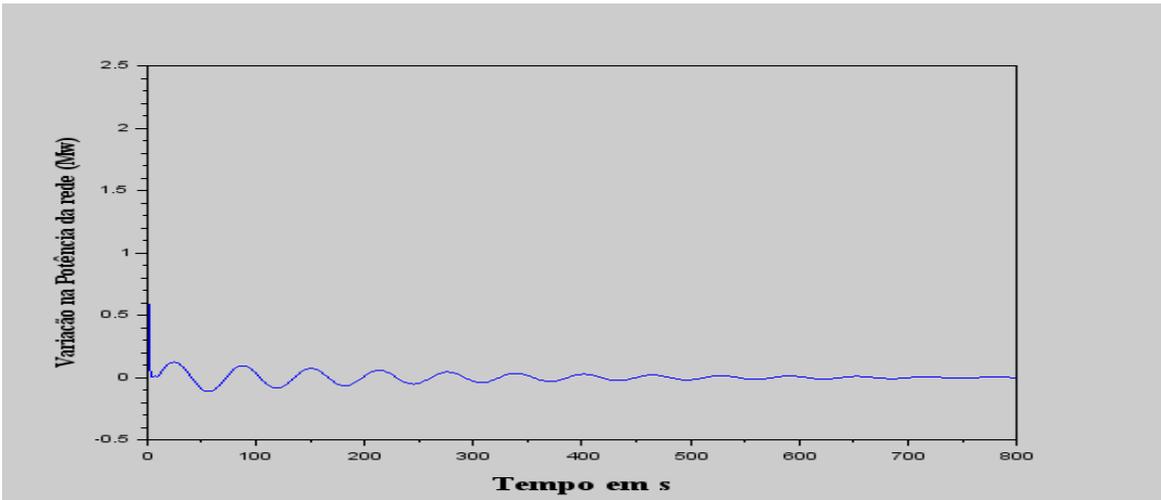


Figura 46 - Variação na potência da rede elétrica

5.1.5. Estabilidade

Local dos Polos e Zeros da Função de Transfência de Malha Aberta

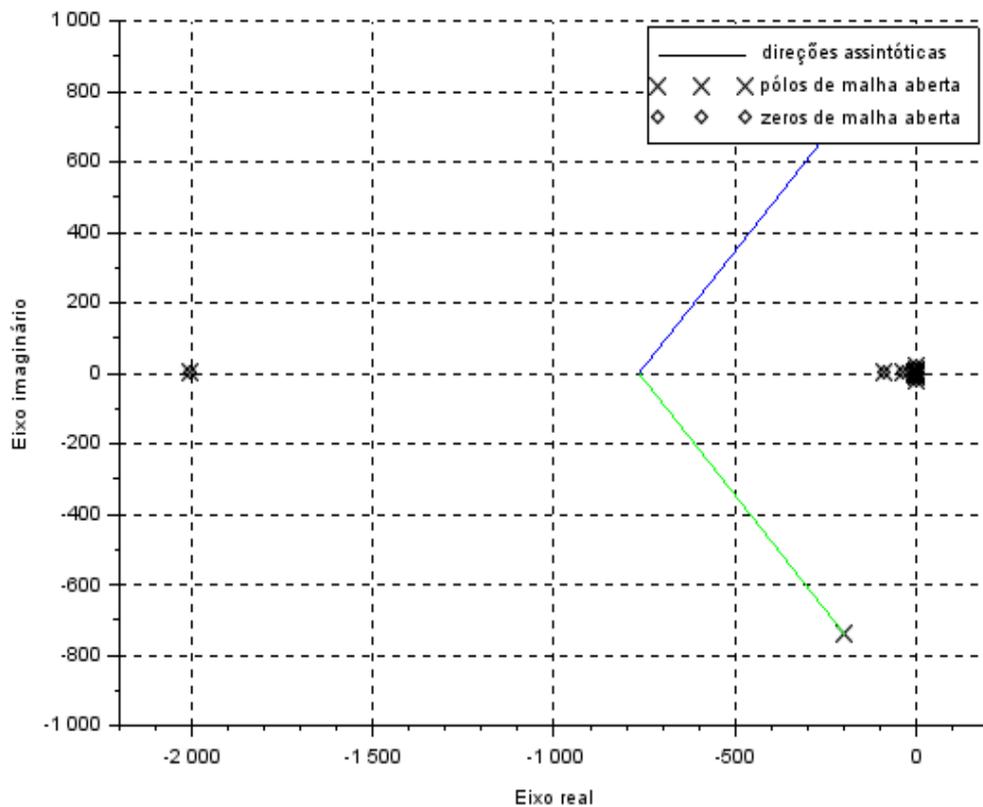


Figura 47 - Polos e zeros da função de transferência de malha aberta

1	-2002.207251
2	-199.6055232141303+739.5201359054099i
3	-199.6055232141303-739.5201359054099i
4	-91.62674253
5	-37.31749405
6	-1.9998815827669496+19.61146375766105i
7	-1.9998815827669496-19.61146375766105i
8	-0.21509072670458373+6.883204978381359i
9	-0.21509072670458373-6.883204978381359i
10	-6.512751578
11	-1.7875307903626816+5.978317148505084i
12	-1.7875307903626816-5.978317148505084i
13	-4.803187538
14	-3.6767220931862776+0.36347602326710027i
15	-3.6767220931862776-0.36347602326710027i
16	-3.351392705
17	-3.010197298
18	-2.667823415405254+0.7895599570067409i
19	-2.667823415405254-0.7895599570067409i
20	-1.96090168
21	-1.1495761792093655+0.6839151600192906i
22	-1.1495761792093655-0.6839151600192906i
23	-0.35443334051146114+0.8662936536610806i
24	-0.35443334051146114-0.8662936536610806i
25	-1.140069402
26	-0.986609538
27	-0.1574891447034862+0.28291696434319635i
28	-0.1574891447034862-0.28291696434319635i
29	-0.333335977
30	-0.301009139
31	-0.200257337
32	-0.157599118
33	-0.11099942
34	-0.100000002
35	-0.030499528
36	-0.028920291
37	-0.012399967
38	-0.009901798
39	-0.001820044
40	-9.26E-04
41	-7.16E-05
42	-7.89E-17
43	6.20E-15

Figura 48 – Valores numéricos dos polos e zeros

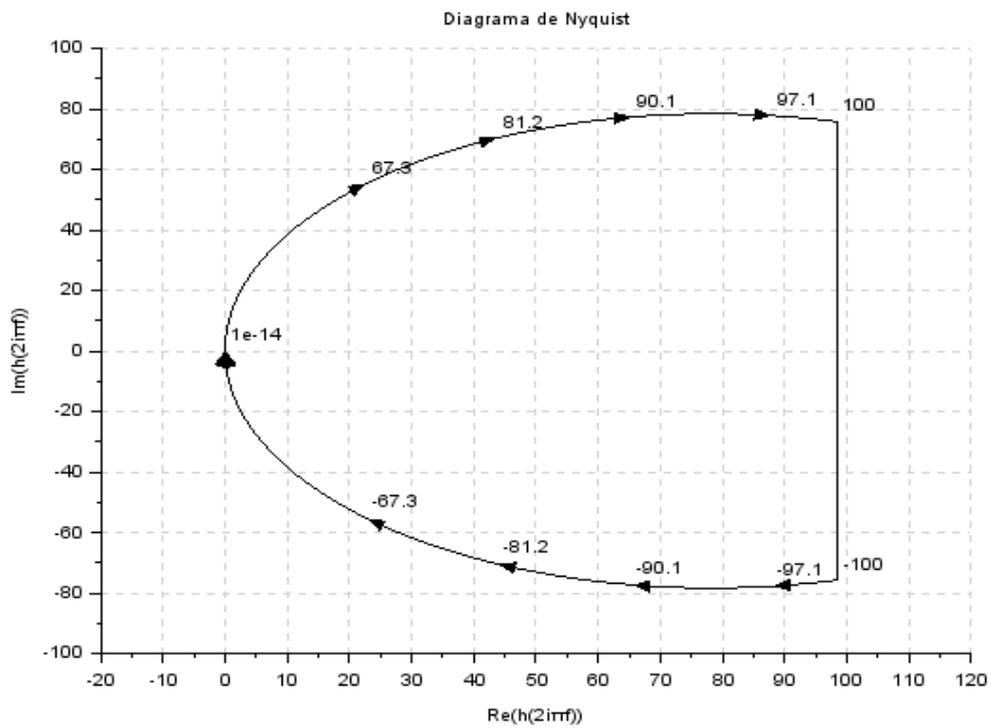


Figura 49 – Diagrama de Nyquist

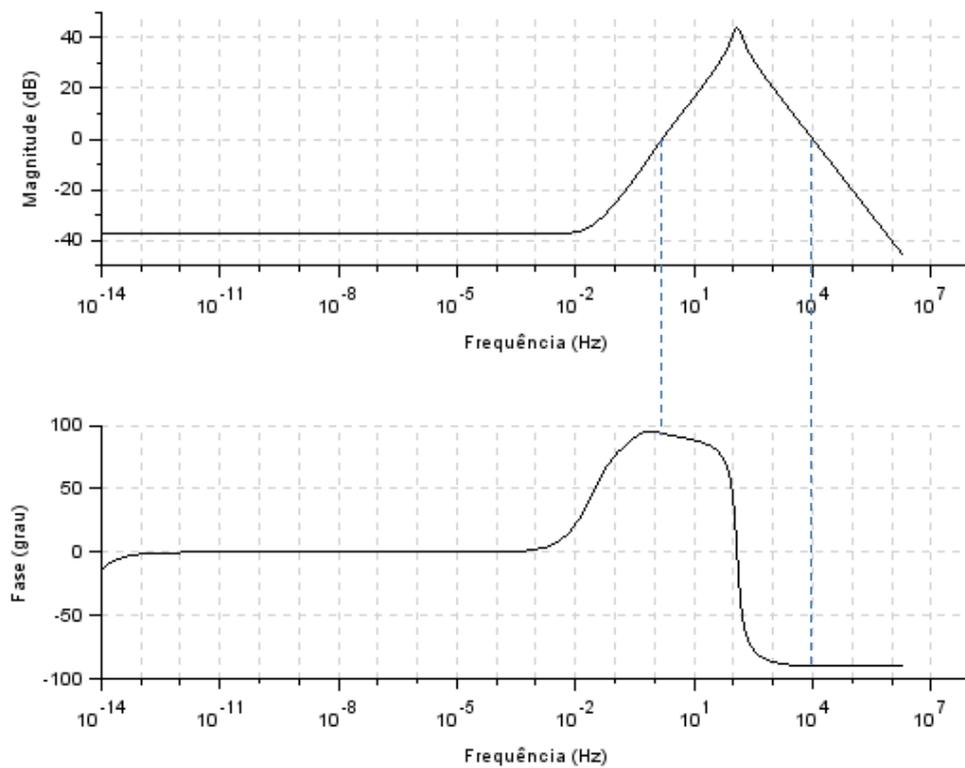


Figura 50 – Diagrama de Bode

5.2. Discussão dos Resultados de Angra 2

Através dos resultados gráficos obtidos é possível observar que a resposta dinâmica no vaso de pressão de reator sofre uma forte influência do efeito da reatividade externa $\left[10 \sin\left(\frac{t}{10}\right) e^{-\frac{t}{250}}\right] \Lambda$ que é uma função oscilatória com um amortecimento exponencial, essa função apresenta valores de máximo nos pontos onde $t = 5\pi$ e 25π que corresponderias aos tempos de 15.7 segundos e 78.75 segundos respectivamente, e ponto de mínimo nos instantes $t = 15\pi$ e 35π que corresponde aos tempos de 51 segundos e 109.9 segundos, estando estes valores compatíveis com os gráficos apresentados. Também é possível notar uma menor amplitude nos valores das curvas ao longo do tempo o que traduz o efeito do amortecimento exponencial. A variação da temperatura do combustível é que mais se assemelha ao comportamento da função presente na reatividade externa, pois está diretamente ligada com as variações da potência nuclear do reator. As outras curvas têm um padrão similar, mas com uma pequena defasagem relacionada ao tempo de resposta do sistema para perceber a perturbação.

Na figura 13 é visto que a condição inicial aplicada para potência nuclear é rapidamente estabilizada, isto ocorre porque a temperatura do combustível, do líquido de refrigeração, pressão no primário e concentração dos precursores estão a princípio em condições de equilíbrio e, portanto, atribuem parcelas nulas no valor da potência nuclear, os desvios posteriores são atenuados pela atuação dos coeficientes de reatividade do combustível, moderador e de pressão. Um novo pico de potência ocorre em $t = 7$, as temperaturas do combustível e do líquido de refrigeração nas zonas 1 e 2 estavam decrescentes e, portanto, inserindo uma reatividade positiva no sistema até o tempo acima citado onde se tem um mínimo local para as 3 variáveis que gera uma ascensão de Potência.

A perturbação inicial gerada na perna quente do reator foi rapidamente equilibrada, o efeito oscilante apresentado é decorrência da reatividade externa que propagou por todo circuito primário. Aqui vale ressaltar o papel do pressurizador em manter o equilíbrio da pressão do sistema. A curva com alta frequência de oscilação na curva do pressurizador ocorre pelo fato que este componente é o responsável por acomodar as variações volumétricas presentes em todo circuito primário, recebendo nas equações responsáveis de sua modelagem, termos das variações de temperatura que envolvem todo este circuito. Na tentativa de manter a pressão constante surgem diversos acionamentos intercalados entre os aquecedores e os aspersores até ocorrer a

convergência da Pressão após 30 segundos.

Na figura 30 é apresentada a variação do nível de água no Gerador de Vapor que mostra a ligação com a variação da potência térmica. Quando a potência sobe, a temperatura da água que está na parte do circuito primário dentro do gerador de vapor também aumenta, e conseqüentemente transfere mais calor para os tubos metálicos, que por sua vez transfere para água do lado secundário. Como já se tem um sistema bifásico nesta parte, começa então haver uma maior taxa de formação de vapor que tem como consequência a queda do nível de água dentro do gerador. O efeito para queda de potência no primário é o oposto ao explicado e resultará na elevação do nível de água.

O sistema de controle do nível do gerador de vapor em conjunto com o sistema de controle da válvula de vapor eliminam boa parte dos efeitos das perturbações geradas no circuito primário como pode ser observado nos gráficos das figuras 31 à 46, mesmo com o distúrbio provocado na pressão de vapor.

O aumento na pressão de vapor provoca também o aumento na densidade de vapor que por sua vez é inversamente proporcional ao volume específico. As expansões e contrações que ocorrem no vapor podem alterar a sua condição de um superaquecimento quase completo. Uma queda da entalpia provoca também uma queda no título de vapor. Essa questão é importante ser bem analisada, pois a presença de uma fase líquida é indesejável nas entradas das turbinas de alta e baixa pressão em virtude da ocorrência de processos de corrosão. Para dimensionar este efeito na simulação realizada, será feita uma breve análise quantitativa. A pressão de vapor na saída do gerador de vapor para Angra 2 é da ordem de 6640 KPa com um título de vapor de 0,998 para uma entalpia de 2778,4 KJ/Kg. No resultado apresentado ocorre uma variação na entalpia de até 0,2 KJ/Kg o que é totalmente irrelevante no título de vapor, alterando somente a quarta casa decimal deste parâmetro.

As variações nos fluxos mássicos dos componentes no circuito secundário são ocasionadas pelo sistema de controle de vapor principal que regula o coeficiente da válvula de vapor para que as vazões que chegam nas turbinas de alta e baixa pressão sejam as mais constantes possíveis para que se possa manter estável a frequência do gerador elétrico bem como a potência na rede elétrica.

Avaliando a estabilidade do sistema é possível notar pelas figuras 47 e 48 que não há nenhum polo da função de transferência de malha aberta no semiplano direito, ou seja, o Valor de P na equação (83) é nulo e pela figura 49 é observado que não há o envolvimento do ponto (-1,0), portanto N também é nulo o que resulta $Z = 0$ indicando a

estabilidade para o critério de Nyquist. A condição acima se traduz no primeiro enunciado deste critério descrito na Página 27.

Pelo diagrama de Bode (figura 50) é notado que a fase não ultrapassa o valor de -180° o que permite avaliar que a resposta dinâmica do sistema para perturbação dada tem um comportamento estável para os critérios propostos.

5.3. Simulação Dinâmica de H. B. Robinson

Os resultados gráficos para H. B. Robinson (HBR) foram gerados a partir da perturbação de:

$$\delta T_{lp} = 2.20 \text{ } ^\circ\text{F} \quad (90)$$

O objetivo deste valor foi comparar com os resultados de [17] que utilizaram um modelo sem o pressurizador, circuito secundário e controle de nível e pressão do gerador de vapor e, com apenas um grupo de precursores. Os autores utilizaram um controlador do tipo regulador linear quadrático (LQR), que pode ser implantado digitalmente. A seguir são apresentados os gráficos equivalentes com [17] acrescidos dos gráficos da pressão no pressurizador, vazão da água de alimentação, coeficiente da válvula de vapor e estabilidade do sistema.

5.3.1. Vaso de Pressão do Reator

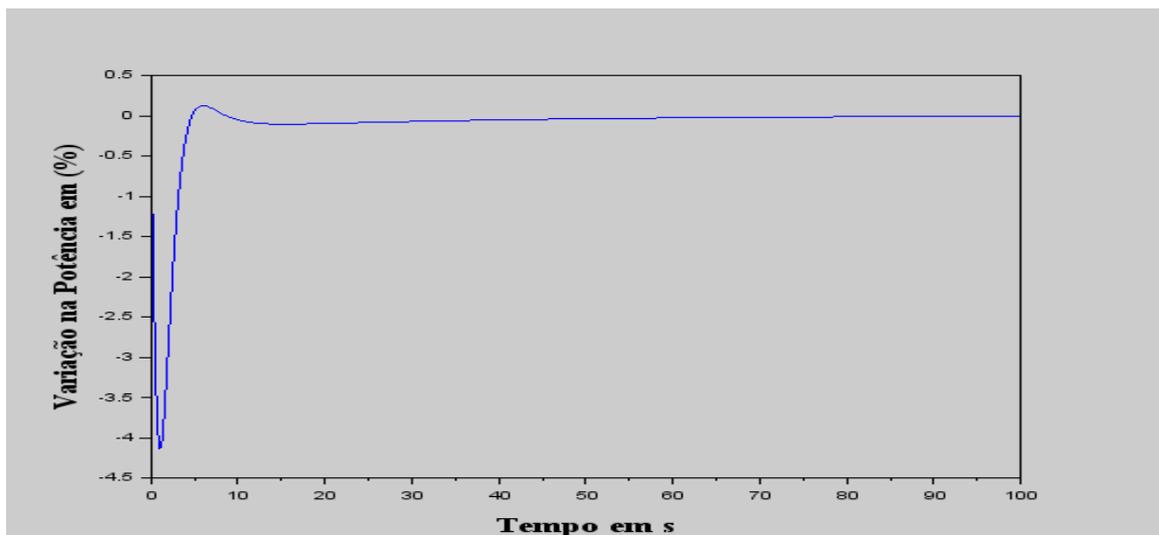


Figura 51 - Variação da potência nuclear (HBR)

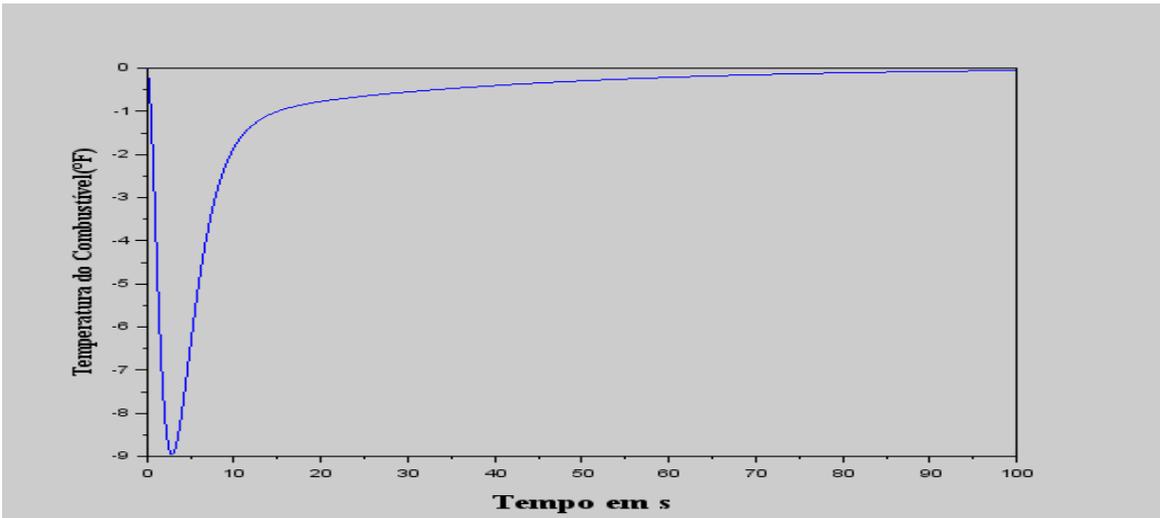


Figura 52 - Variação da temperatura do combustível (HBR)

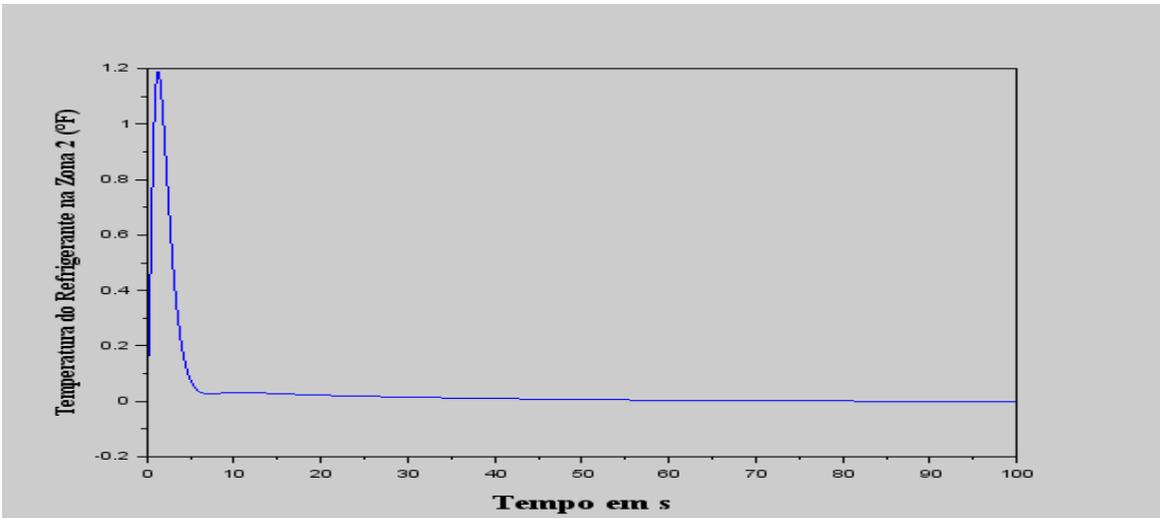


Figura 53 - Variação da temperatura do refrigerante zona 2 (HBR)

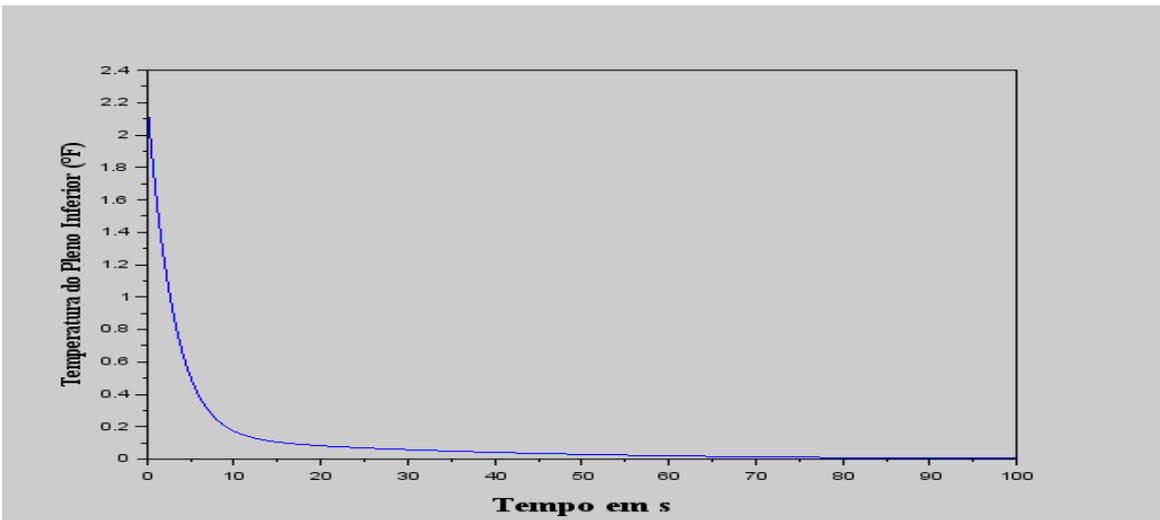


Figura 54 - Variação da temperatura do *plenum* inferior (HBR)

5.3.2. Pressurizador

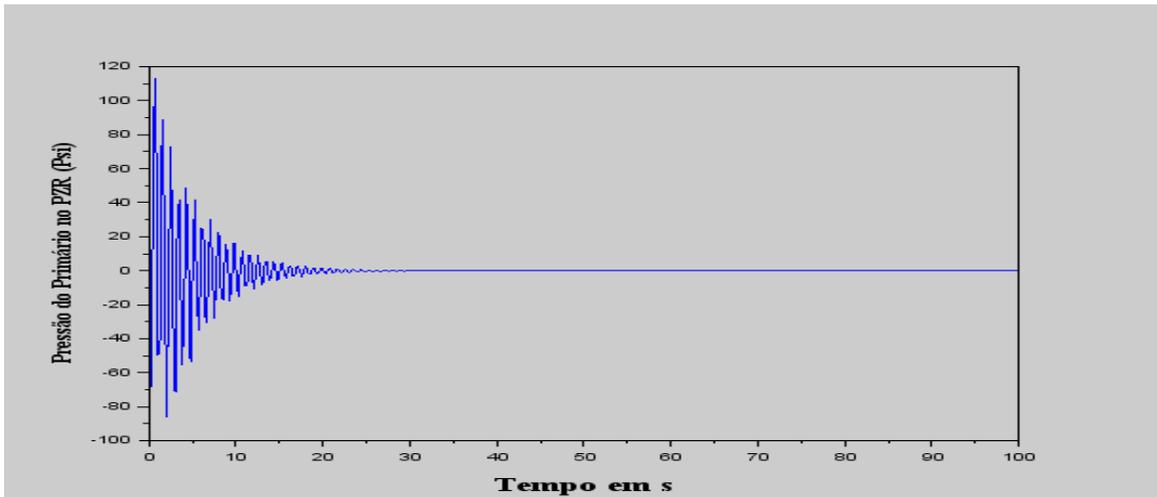


Figura 55 - Variação da pressão no pressurizador (HBR)

5.3.3. Gerador de Vapor

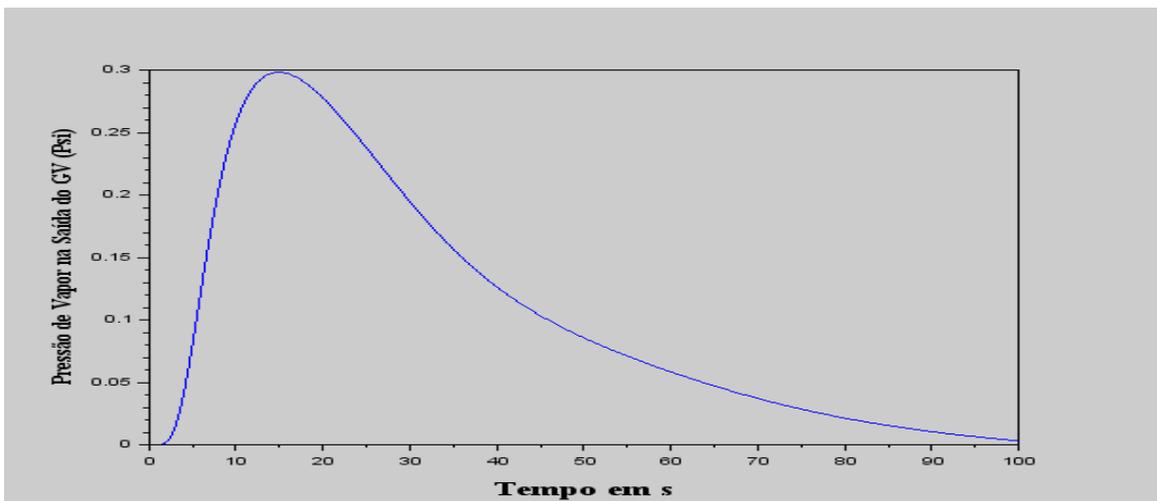


Figura 56 - Variação na pressão de vapor na saída do gerado de vapor (HBR)

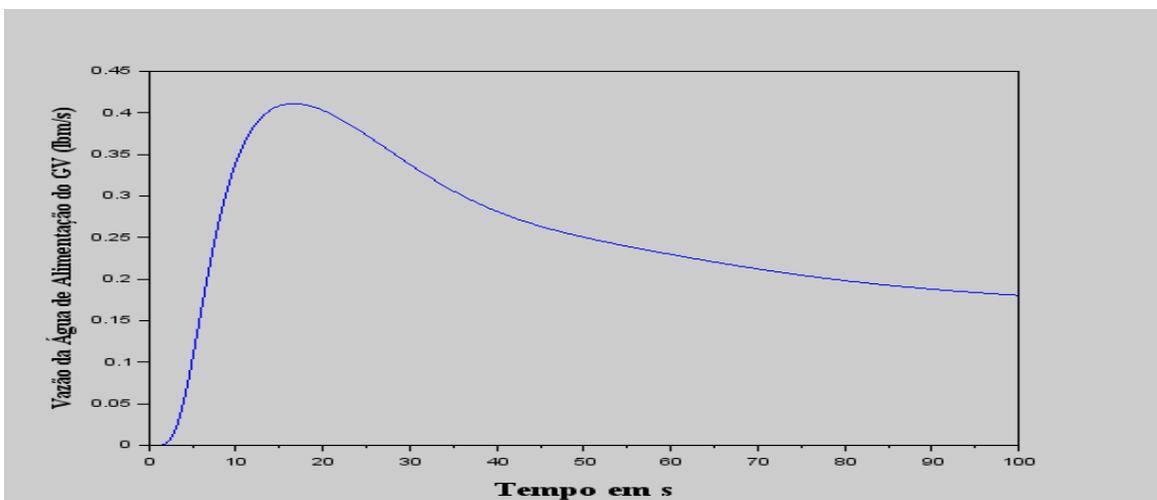


Figura 57 - Variação na vazão da água de alimentação (HBR)

5.3.4. Válvula de Vapor

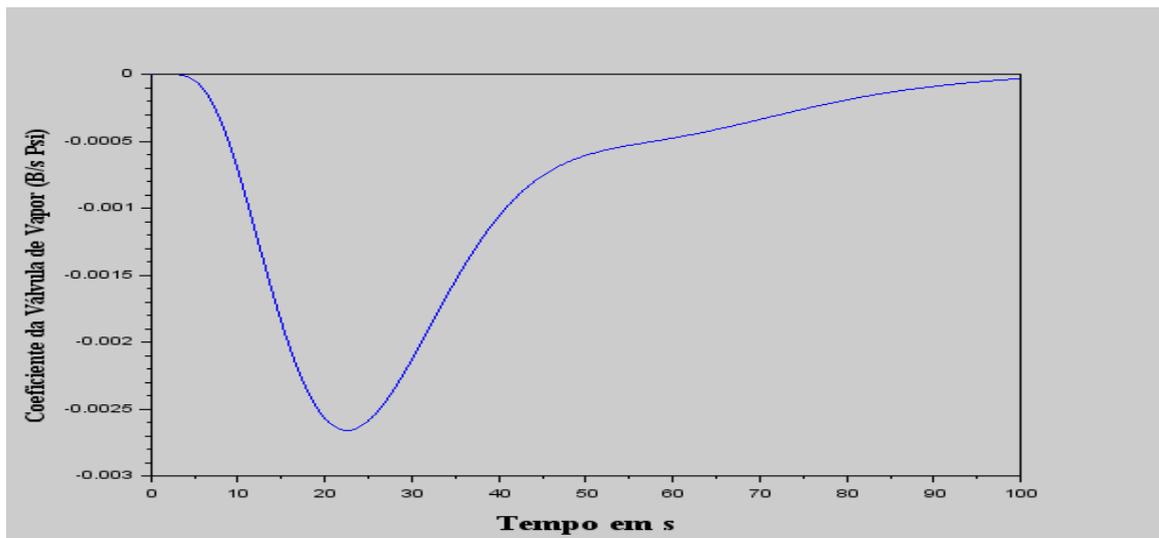


Figura 58 - Variação no coeficiente da válvula de vapor (HBR)

5.3.5. Estabilidade Dinâmica

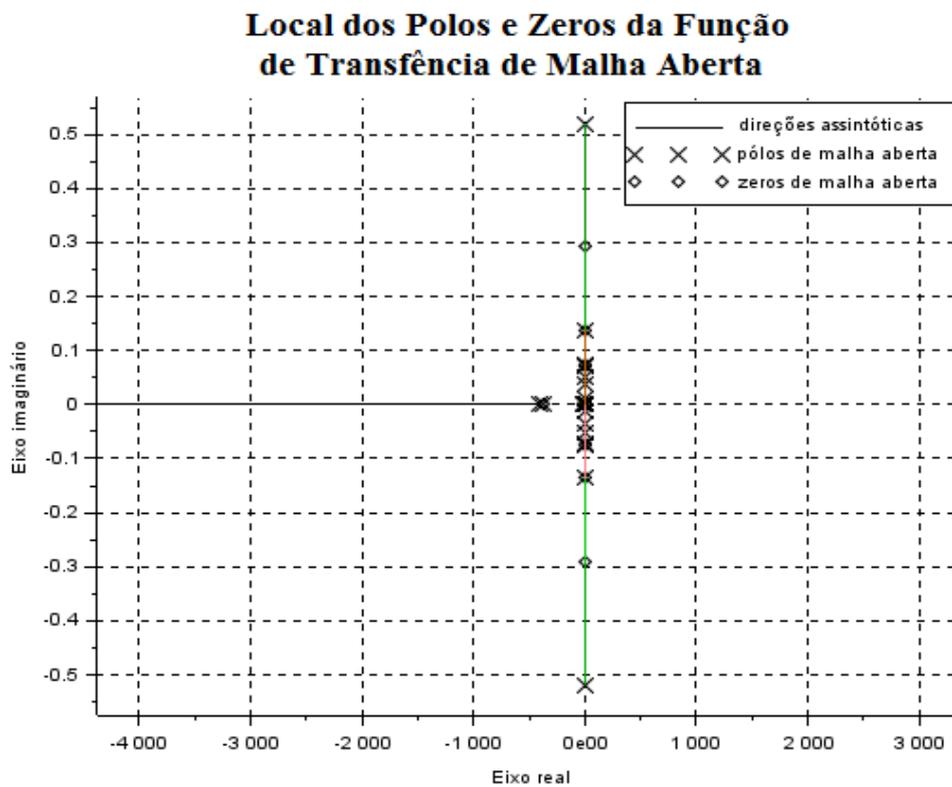


Figura 59 - Polos e zeros da função de transferência de malha aberta (HBR)

1	-400.0865302
2	-377.3136252
3	-1.9894622394547419+19.603558910360015i
4	-1.9894622394547419-19.603558910360015i
5	-13.3728626
6	-8.062750476
7	-4.956716159
8	-4.736429368
9	-3.732973097
10	-3.625698436
11	-2.953638455
12	-2.293487177084492+0.5192319557326834i
13	-2.293487177084492-0.5192319557326834i
14	-2.306062138
15	-0.9430774690552737+0.05182003065349567i
16	-0.9430774690552737-0.05182003065349567i
17	-0.5668158596342919+0.036799170688464285i
18	-0.5668158596342919-0.036799170688464285i
19	-0.49258735
20	-0.376923690976217+0.011796772567823913i
21	-0.376923690976217-0.011796772567823913i
22	-0.333359269
23	-0.2778609310270005+0.0708996718102202i
24	-0.2778609310270005-0.0708996718102202i
25	-0.252307068
26	-0.07562299793887123+0.1361871869801238i
27	-0.07562299793887123-0.1361871869801238i
28	-0.199067747
29	-0.11026780399958104+0.0756389026622359i
30	-0.11026780399958104-0.0756389026622359i
31	-0.135303952
32	-0.105792771
33	-0.099999041
34	-0.027718416
35	-0.025264164
36	-0.012183816
37	-0.010810576
38	-0.009061507
39	-0.001820351
40	-8.94E-04
41	-7.13E-05
42	-8.04E-13
43	2.36E-17

Figura 60 – Valores numéricos dos polos e zeros (HBR)

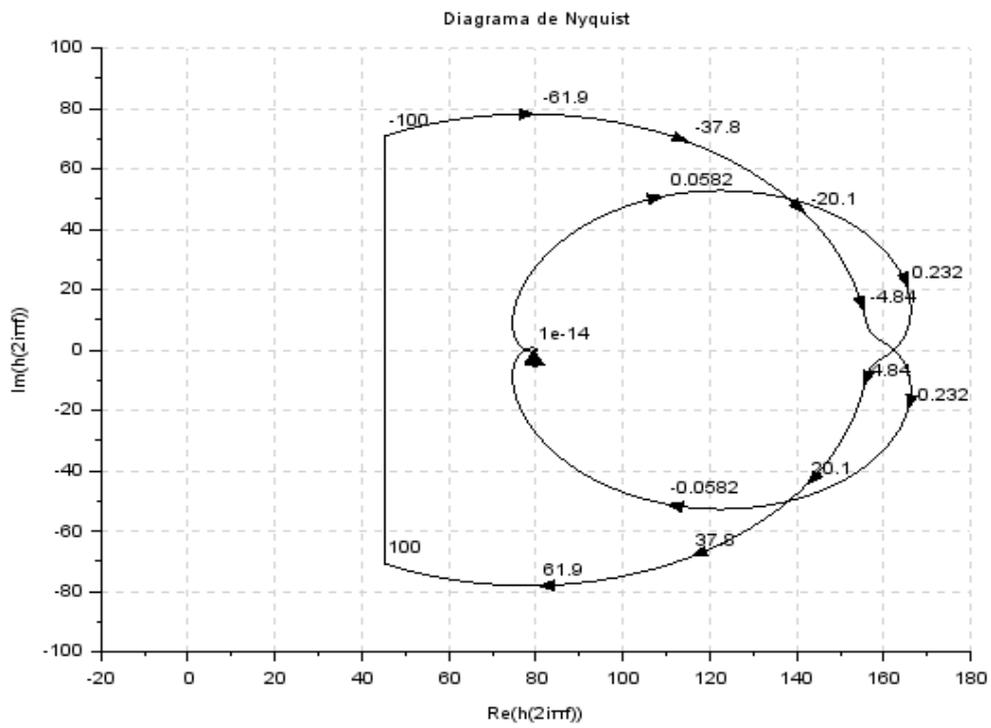


Figura 61 - Diagrama de Nyquist (HBR)

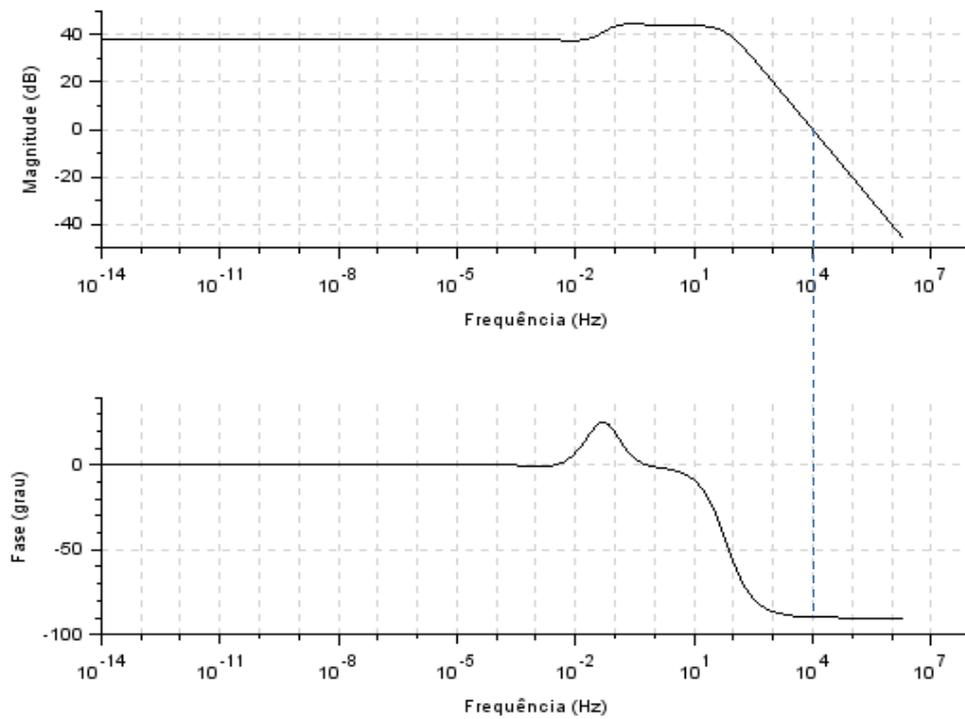


Figura 62 – Diagrama de Bode (HBR)

5.4. Discussão dos Resultados de H. B. Robinson

O aumento provocado na temperatura da água no *plenum* inferior do vaso de pressão do reator tem como objetivo avaliar resposta dinâmica do sistema na região imediatamente anterior onde a potência térmica está sendo gerada. Este aumento resulta na expansão no líquido de refrigeração e conseqüentemente ocorre a perda de densidade, ou seja, as moléculas estarão mais afastadas uma das outras, o que atribuí uma queda na capacidade de moderação dos nêutrons para faixa térmica e, portanto, tem-se uma menor probabilidade de ocorre fissão. O resultado deste processo físico é o declínio da potência térmica que pode ser visto na figura 51.

Em termos de coeficiente de reatividade, tem-se:

$$\text{Coef. do moderador} \rightarrow \alpha_m < 0 \quad \text{e} \quad \text{Coef. do combustível} \rightarrow \alpha_f < 0 \quad (91)$$

Portanto para a condição simulada verifica-se:

$$\delta T_m > 0 \quad \text{Produto} \quad \alpha_m \delta T_m < 0 \quad \rightarrow \quad \text{Inserir reatividade negativa} \quad (92)$$

$$\delta T_f < 0 \quad \text{Produto} \quad \alpha_f \delta T_f > 0 \quad \rightarrow \quad \text{Inserir reatividade positiva} \quad (93)$$

Como o módulo de $|\alpha_m|$ é maior que o $|\alpha_f|$, tem-se uma reatividade global negativa que justifica a queda na potência.

O fato dos coeficientes de reatividades serem negativos é uma questão de segurança inerente do reator. O aumento da temperatura do combustível, por exemplo, resulta em um aumento da seção de choque de captura do U^{238} fazendo com que este elemento tenha uma maior probabilidade de capturar os nêutrons térmicos que estão no núcleo do reator e, portanto, o processo de fissão começa a ser influenciado e a potência do reator diminui. Esse efeito é conhecido como Doppler [3].

Fica evidente na simulação para H. B. Robinson a importância do pressurizador que acomoda as variações volumétricas que ocorre no circuito primário e permite a estabilização da pressão do reator nuclear, conforme apresentado na figura 55.

O aumento da temperatura ao longo do circuito primário implica numa maior taxa de transferência de calor no gerador de vapor o que fica evidente pela figura 56 em que há um aumento na pressão de vapor. A figura 57 mostra que há uma rápida resposta do secundário que aumenta a vazão da água de alimentação para manter o equilíbrio no nível dentro do GV. Este processo é feito complementarmente através da abertura da válvula de vapor (figura 58) que aumenta a vazão neste circuito até que possa aliviar o excesso da pressão de vapor para a turbina, mantendo as vazões de água alimentação e de vapor

iguais, ou seja, anulando qualquer desbalanço entre estas duas variáveis.

Com relação à estabilidade do sistema é possível notar pelas figuras 59 e 60 que não há nenhum polo da função de transferência de malha aberta no semiplano direito e pela figura 61 é observado que não há o envolvimento do ponto $(-1,0)$, sendo, portanto, atendido o primeiro critério de Nyquist.

Pelo diagrama de bode é notado que a fase não ultrapassa o valor de -180° para o momento em que o ganho logarítmico é nulo, o que permite avaliar que a resposta dinâmica do sistema para perturbação dada tem um comportamento estável.

6. Conclusão

O modelo apresentado em [16] resume-se apenas ao circuito primário da usina nuclear o que não permite avaliar o efeito das perturbações aplicadas ao longo do circuito secundário, como é o caso deste trabalho. Em ambos os casos existe uma maior geração de energia pela demanda de potência da rede externa oscilatória, pela perturbação inicial na potência nuclear e pelo aumento da temperatura no circuito primário (perna quente), que no caso do artigo é bem maior. Nos dois casos há uma perturbação inicial na pressão de vapor.

Uma maior transferência de calor para o secundário iria demandar maior consumo d'água de alimentação dos geradores de vapor com diminuição de nível e o surgimento de uma elevada pressão de vapor. A compensação do desbalanço (vazão de água x vazão de vapor) pelo aumento da vazão de água de alimentação (mais fria) poderia provocar um efeito de “encolhimento” da água no estado líquido dentro do Gv (*shrink effect*) sendo possível ocorrer um desligamento da usina nuclear por baixo nível de água nos geradores de vapor. O Aumento súbito na pressão de vapor também geraria a possibilidade de atingir o limite de pressão de vapor no secundário, com abertura prévia de válvulas de alívio e de segurança, sendo também uma possível causa para desligamento do reator.

As curvas mostradas anteriormente na seção de resultados demonstram que o sistema foi controlado de forma estável pelos sistemas de controle (pressão e reatividade/potência do primário), incluindo o sistema de controle de nível de água no gerador de vapor (atuação da válvula de água de alimentação dos geradores de vapor), ou seja, as oscilações foram convergentes e os desvios retornaram para zero ou próximo de zero, o que era esperado pela análise da estabilidade através das posições das raízes e pelos diagramas de Nyquist e Bode, como descrito anteriormente nas seções pertinentes deste trabalho. Os limites das variáveis de estado não foram objeto deste estudo, já que não foram simulados os diversos desligamentos do reator e da turbina pelo sistema de proteção do reator, o que se recomenda que seja feito em trabalhos futuros incorporando este sistema na simulação.

Em comparação com a simulação dinâmica realizada [16] é possível analisar que o modelo dos autores teve uma melhor resposta na estabilização do efeito provocado pelo ρ_{ext} , que representa uma perturbação advinda da demanda de rede elétrica externa. Tal fato se deve ao uso de um sistema de controle digital que permite que todas as variáveis de controle (aspersores, aquecedores, reatividade, nível de água no Gv e vazão de vapor)

sejam controladas de forma simultânea.

Para o caso de H. B. Robinson percebe-se uma melhor resposta dinâmica do modelo realizado neste trabalho em relação à referência [17] que utiliza um sistema de controle digital. As ausências do pressurizador, circuito secundário e controle de nível e pressão do gerador de vapor e, com apenas um grupo de precursores fornecem resultados em [17] para o tipo de perturbação dada (variação de 2,2 graus Fahrenheit na temperatura do *plenum* inferior do Vaso de pressão) que não permitem avaliar adequadamente os efeitos do sistema primário no sistema secundário, bem como o comportamento da pressão no primário.

As curvas obtidas neste trabalho foram praticamente idênticas ao do artigo [17] em forma e valores de pico, bem como no amortecimento no tempo. Entretanto, no caso deste trabalho, podem-se observar os efeitos de outras variáveis não simuladas em [17], ou seja, pressão do primário e coeficiente de abertura da válvula de vapor da turbina, que apresentaram comportamento oscilatório convergente e estável com retorno dos desvios destas variáveis a zero.

A modelagem do circuito secundário deste trabalho foi de fundamental importância para o entendimento de questões relacionadas à operação de uma usina nuclear, bem como o entendimento do alto nível de acoplamento entre o circuito primário e secundário. Um aumento no valor da potência térmica, por exemplo, só pode ser efetuado se o circuito secundário tiver condições de receber essa alteração de carga, sem causar oscilações não admissíveis nas variáveis de estado do secundário, tais como, nível e pressão do gerador de vapor e frequência de rotação do turbogerador. Outras análises também podem ser relevantes tais como: oscilações na rede elétrica, alterações na abertura ou fechamento da válvula de vapor, mudanças nas propriedades termodinâmicas do vapor que chegam nas turbinas, dentre outras possíveis de ocorrerem.

A implementação de um Sistema Digital permite em geral um controle e monitoração simultâneo de todos os processos da usina nuclear. Entretanto, é necessário avaliar bem esse tipo de controle, com critérios de segurança específicos para este tipo de projeto, pois os programas/códigos de computadores que realizam este tipo de tarefa, também são passíveis de erros, podendo causar o surgimento de estados intermediários de falhas no processamento de dados que podem não ser perceptíveis aos operadores da sala de controle de uma usina nuclear, antes de atingir um estado final de falha, que ultrapasse as capacidades cognitivas destes operadores.

Embora não seja o objetivo deste trabalho a avaliação do desempenho de

controladores digitais, tais como aqueles que foram utilizados nos artigos citados, para comparação de resultados, fica aqui a recomendação de futuros trabalhos em que haja substituição dos controladores PID tradicionais, implementados analogicamente, por diversos tipos de algoritmos de controle, que podem ser implementados de forma digital, para o estudo do desempenho comparativo em eventos similares aos que foram apresentados.

Referências

- [1] IAEA, **IAEA Nuclear Power Reactors in the World**. 36° ed. Vienna, Austria: IAEA, 2016. 86 p. (2).
- [2] ELETROBRAS - ELETRONUCLEAR (Org.). **Angra 2**. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/aempresa/centralnuclear/angra2.aspx>>. Acesso em: 21 nov. 2016.
- [3] DUDERSTADT, J. J.; HAMILTON, L. J., **Nuclear Reactor Analysis**. Nova York: John Wiley & Sons, 1976.
- [4] EL-WAKIL, M. M., **Nuclear Heat Transport**. Madison, Wisconsin: International Textbook Company, 1971. 511 p.
- [5] USNRC (Ed.), **H. B. Robinson Steam Electric Plant, Unit 2**, 2016. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/info-finder/reactors/rob2.html>>. Acesso em: 19 jan. 2017.
- [6] DORF, R. C., BISHOP, R. H., **Sistemas de Controle Modernos**. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
- [7] TODREAS, N. E., KAZIMI, M. S., **Nuclear Systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals**. Nova York: Taylor & Francis, 1993. 705 p.
- [8] OLEGARIO, L. C., **Simulação Dinâmica de um PWR com Modelagem do Sistema Primário, Pressurizador e Geradores de Vapor**, 2016, 61 p., TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Nuclear, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- [9] OGATA, K., **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª ed., São Paulo: Pearson, 2010. 796 p.
- [10] FREELS, J. d., ***An Investigation of High Order and Low Order Dynamic Modeling of a Complete Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant***, 1976, 325 p., Dissertação de Mestrado, Nuclear Engineering Course, University Of Tennessee, Knoxville, 1979.
- [11] NAGHEDOLFEIZI, M., ***Dynamic Modeling of a Pressurized Water Reactor Plant for Diagnostics and Control***, 1990. 177 p., Dissertação de Mestrado, Nuclear Engineering Course, University of Tennessee , Knoxville, 1990.
- [12] ALI, M. R. A., ***Lumped Parameter, State Variable Dynamic Models for U-tube Recirculation Type Nuclear Steam Generators***, 1976, 281 p., Tese de Doutorado, Nuclear Engineering Course, University Of Tennessee, Knoxville, 1976.

- [13] DRAW.IO (Org.), 2017. Disponível em: <<https://www.draw.io/>>. Acesso em: 15 jan. 2017.
- [14] PHILLIPS C. L., HARBOUR R. D., **Sistemas de Controle Realimentado**. São Paulo: Makron Books, 2000.
- [15] @SCILAB (Org.), 2016. Disponível em: <<http://www.scilab.org/>>. Acesso em: 25 abr. 2016.
- [16] MAHMOUD, M. S., MASOOD, K., QURESHI, A., “Improved digital controller design for Robinson nuclear plant”. *IET Control Theory & Applications*, [s.l.], v. 6, n. 9, pp. 1229-1237, 2012. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-cta.2011.0084>.
- [17] NAIR, P. P., GOPAL, M., “Sensitivity-reduced design for a nuclear pressurized water reactor”. *IEEE Transactions On Nuclear Science*, Institute of Electrical And Electronics Engineers, v. 34, n. 6, pp.1834-1842, 6 Dez. 1987.

Apêndice A

Neste Apêndice é possível obter as equações algébricas que estão inseridas na modelagem dinâmica apresentada no capítulo 3, mais precisamente inseridas no cálculo do circuito secundário do Reator Nuclear. As seguintes expressões podem também ser encontradas em [10].

A.1. Vazão mássica que entra no separador de umidade

$$\delta w_1 = NUTSG(\epsilon_0 \delta P_s + w_{s0} \frac{\delta \epsilon}{\epsilon_0}) \quad (\text{A.1})$$

A.2. Vazão mássica que sai do separador de umidade

$$\delta w_2 = \frac{\sqrt{g_c} A_{K2}}{2 \sqrt{P_c \rho_c - P_R \rho_R}} (P_c \delta \rho_c + \rho_c \delta P_c - P_R \delta \rho_2 - \rho_2 \delta P_R) \quad (\text{A.2})$$

A.3. Vazão mássica que entra no reaquecedor na parte externa aos tubos

$$\delta w_2' = \left(\frac{h_2 - h_f}{h_{fg}} \right) \delta w_2'' - \frac{w_2''}{h_{fg}} \delta h_2 \quad (\text{A.3})$$

A.4. Vazão mássica que sai do reaquecedor na parte externa aos tubos

$$\delta w_3 = \frac{\sqrt{g_c} k_3}{2 \sqrt{P_R \rho_R}} (P_R \delta \rho_R + \rho_R \delta P_R) \quad (\text{A.4})$$

A.5. Vazão mássica que entra no reaquecedor parte interna aos tubos

$$\delta w_{pr} = \epsilon_2 \delta P_s + w_{pr} \frac{\delta \epsilon_0}{\epsilon_0} \quad (\text{A.5})$$

A.6. Pressão de vapor que sai do separador de umidade

$$\delta P_c = \frac{j}{g_c} [\rho_c k_1 \delta h_c + (k_1 h_c - k_2) \delta \rho_c] \quad (\text{A.6})$$

A.7. Pressão de vapor que entra no reaquecedor

$$\delta P_R = \frac{j}{g_c} [\rho_R k_1 \delta h_R + (k_1 h_R - k_2) \delta \rho_R] \quad (\text{A.7})$$

A.8. Entalpia de vapor que entra no separador de umidade

$$\delta h_s = \left(\frac{\partial h_g}{\partial P_s} \right) \delta P_s \quad (\text{A.8})$$

A.9. Temperatura que entra no separador de umidade

$$\delta T_s = \left(\frac{\partial T_{sat}}{\partial P_s} \right) \delta P_s \quad (\text{A.9})$$

A.10. Temperatura no lado externo dos tubos do reaquecedor

$$\delta T_R = \frac{\delta h_r}{\left(\frac{R}{j} + C_v \right)} \quad (\text{A.10})$$

A.11. Entalpia de vapor que sai do separador de mistura

$$\delta h_2 = \left(\frac{\partial h_2}{\partial P_R} \right) \delta P_R \quad (\text{A.11})$$

A.12. Potência mecânica gerada nas turbinas

$$\delta P_m = \Omega (\delta T_{HP} + \delta T_{LP}) \quad (\text{A.12})$$

A.13. Torque da turbina de alta pressão

$$\delta T_{HP} = \frac{\eta_{HP}}{j \Omega} [w_2 \delta h_c - w_2 \delta h'_2 + (h_c - h'_2) \delta w_2] \quad (\text{A.13})$$

A.14. Torque da turbina de baixa pressão

$$\delta T_{LP} = \frac{\eta_{LP}}{j \Omega} \left[\left(\frac{w_3 + w'_3}{2} \right) \delta h_R + \left(\frac{h_R - h'_4}{2} \right) (\delta w_3 + \delta w'_3) \right] \quad (\text{A.14})$$

A.15. Entalpia no ponto final isentrópico da turbina de alta pressão

$$\delta h'_2 = 0.3678 \delta P_R - 0.10 \delta P_C \quad (\text{A.15})$$

A.16. Densidade vapor no ponto final isentrópico da turbina de alta pressão

$$\delta \rho'_2 = \left(\frac{P_R}{P_C} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \delta \rho_c + \left(\frac{P_R}{P_C} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{\rho_c}{\gamma P_R} \delta P_R - \left(\frac{P_R}{P_C} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{\rho_c}{\gamma P_C} \delta P_C \quad (\text{A.16})$$

Apêndice B

Parâmetros utilizados para a modelagem dinâmica de Angra 2. A sigla (Adm) representa um valor adimensional.

Núcleo do Reator			
P_0	Potencia térmica nominal	3750	M_{wt}
λ_1	Constante de decaimento dos nêutrons retardados Grupo 1	0,0124	s^{-1}
λ_2	Constante de decaimento dos nêutrons retardados Grupo 2	0,0305	s^{-1}
λ_3	Constante de decaimento dos nêutrons retardados Grupo 3	0,111	s^{-1}
λ_4	Constante de decaimento dos nêutrons retardados Grupo 4	0,301	s^{-1}
λ_5	Constante de decaimento dos nêutrons retardados Grupo 5	1,14	s^{-1}
λ_6	Constante de decaimento dos nêutrons retardados Grupo 6	3,01	s^{-1}
Λ	Tempo médio de geração de nêutrons	0,000016	s^{-1}
β_1	Fração de nêutrons retardados Grupo 1	0,00021	Adm
β_2	Fração de nêutrons retardados Grupo 2	0,0014	Adm
β_3	Fração de nêutrons retardados Grupo 3	0,00125	Adm
β_4	Fração de nêutrons retardados Grupo 4	0,00253	Adm
β_5	Fração de nêutrons retardados Grupo 5	0,00074	Adm
β_6	Fração de nêutrons retardados Grupo 6	0,00027	Adm
β	Fração de nêutrons retardados Total	0,0064	Adm
α_f	Coefficiente de reatividade do Combustível (Doppler)	-0,0000284	$1 / ^\circ C$
α_m	Coefficiente de reatividade do Moderador	-0,0003930	$1 / ^\circ C$
α_p	Coefficiente de vazio da variação da pressão	-1,2345E-10	$1 / Pa$
C_{pF}	Condutividade térmica do combustível	365	$j / ^\circ C Kg$
C_{pc}	Condutividade térmica do moderador	5880	$j / ^\circ C Kg$
M_f	Massa de combustível	116460	kg
d	Densidade do líquido de refrigeração	832	kg/m^3
W_c	Vazão Mássica do líquido de refrigeração no circuito primário	17230	kg/s
M_c	Massa de refrigerante no circuito Primário	17450	kg
h	Coefficiente de transferência de calor total do combustível	7060395	$W / ^\circ C$
h_1	Coefficiente de transferência de calor do combustível	1172,2	$w/m^2 ^\circ C$
A_f	Área de transferência total do combustível no nucleo do reator	6023,2	m^2
v	Velocidade do refrigerante	4,74	m/s
Alt	Altura ativa	3,9	m
R_s	Reatividade inserida a cada passo da barra de controle	0,034	pcm/s

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na modelagem do núcleo do reator

Tubulações e Plenos			
W_c	Vazão Mássica do líquido de refrigeração no circuito primário	17230	kg/s
V_{up}	Volume do Pleno Superior do Vaso de Pressão	59,2	m^3
V_{hl}	Volume da Perna Quente	3,18	m^3
V_{ip}	Volume do Pleno de Entrada do Gerador de Vapor	6,8	m^3
V_{op}	Volume do Pleno de Saída do Gerador de Vapor	6,6	m^3
V_{cl}	Volume da perna fria	8,21	m^3
V_{lp}	Volume do pleno Inferior do Vaso de Pressão do Reator	76,3	m^3
d	Densidade do líquido de refrigeração	832	kg/m^3

Tabela 2 - Parâmetros utilizados na modelagem das tubulações e plenums

Gerador de Vapor			
d	Denidade do refrigerante no primario	832	kg/m ³
h_{pm}	Coeficiente de transferência de calor do primário para tubos Gv	12018	w/m ² °C
A_{ms}	Área externa dos tubos do GV	5400	m ²
T_{OD}	Diametro externo do tubo do GV	0.022	m
T_{MT}	Espessura do tubo do Gv	0.0012	m
d_m	Denidade do metal	8190	kg/m ³
A_{pm}	Área interna dos tubos do GV	4811	m ²
M_m	Massa do metal	50200	kg
V_{SGT}	Volume de água dentro dos tubos de GV	25.4	m ³
C_m	Condutância térmica do metal	540	j/Kg °C
(dT_{sat}/dP)	Varição da temperatura de saturação com a pressão	0.0000112	°C/pa
h_{ms}	Coeficiente de transferência de calor tubos Gv para secundário	12018	w/m ² °C
W_{s0}	Vazão de vapor no GV	544.75	kg/s
c1	Coeficiente da válvula de vapor	1.3	Kg/s Pa
h_g	Entalpia do vapor que sai do Gerador de Vapor	2780000	j/kg
C_{p2}	Coeficiente térmico da água do secundario	4910	j/Kg°C
M_w	Massa de água no secundário	18983	kg
(dh_f/dP)	Varição da entalpia com a pressão	0.057154	j/Kg pa
h_{FW}'	Entalpia da água de alimentação	1197890	j/kg
M_{ss}	Massa de vapor no secundário	584.8	kg
(dh_g/dP)	Varição da entalpia de vapor com a pressão	-0.119	j/Kg pa
(dh_{fg}/dP)	Varição da entalpia de saturação com a pressão	-0.067	j/Kg pa
v_{fg}	Volume específico de saturação	0.03117	m ³ /kg
(dv_g/dP)	Varição do volume específico de vapor com a pressão	-8.16E-09	m ³ /kg pa
A_{dw}	Área efetiva da Água dentro do GV	9,40	m ²

Tabela 3 - Parâmetros utilizados na modelagem do gerador de vapor

Sistema de Controle do Gerador de Vapor			
τ	Constante de tempo para o filtro do controlador PID	5	s
τ_1	Reset para sinal de nível	199,5	s
τ_2	Reset para sinal de vazão	17,87	s
k_1	Ganho Proporcional para o nível do sinal	75,4	Adm
k_2	Ganho Proporcional para o sinal de vazão	30,6	Adm
k	Ganho Proporcional para ajuste da posição da válvula	31,85	Adm
w_n	Frequência natural não amortecida do posicionamento da válvula	0,63	Adm
ζ	Taxa de amortecimento do posicionador da válvula	3,18	Adm

Tabela 4 - Parâmetros utilizados na modelagem do sistema de controle do gerador de vapor

Pressurizador			
P_{p0}	Pressão inicial no pressurizador	15700000	pa
P_{s0}	Pressão de vapor inicial no pressurizador	15700000	pa
R	Constante real dos gases em grau rankine	460	$\text{J s}^2/\text{°R Kg m}$
V_{s0}	Volume inicial de vapor no pressurizador	25,5	m^3
d	Densidade do líquido de refrigeração	832	kg/m^3
d_v	Densidade de vapor no pressurizador	104	Kg/m^3
(dT_s/dP_s)	Temperatura de saturação por pressão de saturação	5,0955E-06	$^\circ\text{C/pa}$
(dT_w/dP)	Varição da temperatura da água com a pressão	5,0955E-06	$^\circ\text{C/pa}$
V_{pZR}	Volume do pressurizador	40	m^3
(dH_w/dP)	Varição da entalpia da água com a pressão	0,06	J/Kg pa
(dv_w/dP)	Varição do volume específico da água com a pressão	6,72E-11	$\text{m}^3/\text{kg pa}$
H_{fg}	Entalpia de saturação da água no pressurizador	960000	J/Kg
v_w	Volume específico da água no pressurizador	0,001708	m^3/kg
H_{wi}	Entalpia da água na entrada no pressurizador	1562000	J/Kg
H_{w0}	Entalpia da água na saída no pressurizador	1629000	J/Kg
H_{sp0}	Entalpia inicial da água do Aspensor	1336162	J/Kg
θ_{C1}	Varição da densidade com a temperatura zona 1	2,89	$\text{Kg/m}^3\text{°C}$
θ_{C2}	Varição da densidade com a temperatura zona 2	2,89	$\text{Kg/m}^3\text{°C}$
θ_{UP}	Varição da densidade com a temperatura do Pleno Superior	3,01	$\text{Kg/m}^3\text{°C}$
θ_{HL}	Varição da densidade com a temperatura da Perna Quente	4,53	$\text{Kg/m}^3\text{°C}$
θ_{LP}	Varição da densidade com a temperatura Pleno Inferior	2,06	$\text{Kg/m}^3\text{°C}$
θ_{CL}	Varição da densidade com a temperatura da Perna Fria	1,59	$\text{Kg/m}^3\text{°C}$
θ_{IP}	Varição da densidade com a temperatura do Pleno de entrada do GV	2,60	$\text{Kg/m}^3\text{°C}$
θ_{SGT}	Varição da densidade com a temperatura da água dentro dos tubos GV	1,78	$\text{Kg/m}^3\text{°C}$
θ_{OP}	Varição da densidade com a temperatura outer plenun gv	2,63	$\text{Kg/m}^3\text{°C}$
T_s	Temperatura de vapor no pressurizador	619	K
K	Constante de proporcionalidade do controlador PID do aquecedor	-7,25	w/Pa
τ_{aq}	Constante de tempo do controlador PID do aquecedor	900	s
τ_{ap}	Constante de tempo do controlador PID do aspensor	200	s
G_{sp}	Fator de ganho do controlador PID do Aspensor	75	Kg/Pa

Tabela 5 - Parâmetros utilizados na modelagem do pressurizador

Sistema de Controle da Válvula de Vapor			
τ	Constante de Tempo	0.2	s
k_g	Ganho	1.271E-06	1/Mw
R_g	Ganho na Frequência	3.00E-06	Hz/Mw
D	Fator de Amortecimento	8333	Mw/Hz
M	Constante de inércia mecânica	83330	Mw s/Hz

Tabela 6 - Parâmetros utilizados na modelagem no sistema de controle da válvula de vapor

Circuito Secundário			
w_1, w_2	Vazão Mássica que entra e sai da caixa misturadora	2068.35	kg/s
w_2', w_3	Vazão Mássica que entra e sai do reaquecedor parte externa aos tubos	1456.714	kg/s
w_{pr}, w_{pr}'	Vazão Mássica que entra e sai do reaquecedor parte interna dos tubos	125.31	kg/s
w_{ms}	Vazão mássica de água que sai do separador de mistura e vai para Aquecedor 2	230.604	kg/s
w_s, w_{fw}	Vazão Mássica da Água de Alimentação e vapor no Gerador de vapor em condição inicial	2200	kg/s
w_2''	Vazão Mássica de Vapor que deixa a a turbina de alta pressão para o separador de mistura	1781.555	kg/s
w_3'	Vazão Mássica de Vapor que deixa a a turbina de baixa pressão para o condensador	1121.05	kg/s
w_{hp2}	Vazão Mássica de Água que sai do Aquecedor 1 para o Aquecedor 2	1391.34	kg/s
k_{bhp}	Fração de vapor extraída da Turbina de Alta Pressão para Aquecedor 2	0.12	Adm
k_{blp}	Fração de vapor extraída da Turbina de Baixa Pressão para Aquecedor 1	0.14	Adm
τ_{h1}	Constante de tempo de transferência de calor para Aquecedor 1	100	s
τ_{h2}	Constante de tempo de transferência de calor para Aquecedor 2	40	s
τ_{hp2}	Constante de tempo para Aquecedor 2	10	s
τ_{w3}	Constante de tempo para passagem do fluido na Turbina de Baixa Pressão	10	s
τ_{r2}	Constante de tempo para transferência de calor no Reaquecedor	4	s
τ_{r1}	Constante de tempo para passagem do fluido no Reaquecedor	3	s
τ_{w2}	Constante de tempo para passagem do fluido na Turbina de Alta Pressão	2	s
h_4'	Entalpia no ponto final isentrópico da Turbina de baixa pressão	2.3276	Mj/kg
h_r	Entalpia de vapor na saída do reaquecedor	2.9106	Mj/kg
h_2	Entalpia de vapor na saída da turbina de alta pressão	2.5163	Mj/kg
h_s, h_c	Entalpia de vapor na entrada e saída da caixa misturadora	2.7748	Mj/kg
h_f	Entalpia da água no separador de mistura	0.7893	Mj/kg
h_{fg}	Calor Latente de vaporização da água no separador de mistura	1.99384	Mj/kg
h_2'	Entalpia no ponto final isentrópico do separador de mistura	2.7748	Mj/kg
h_4	Entalpia de vapor que entra no Condensador	2.3276	Mj/kg
ρ_2	Densidade de vapor que sai da turbina de alta pressão	5.95	Kg/m ³
ρ_c	Densidade de vapor que sai da caixa misturadora	34.26	Kg/m ³
ρ_R	Densidade de vapor que sai do reaquecedor	4.94	Kg/m ³
P_R	Pressão na entrada no reaquecedor	0.11682	Kgf/m ²
P_c	Pressão na saída da caixa misturadora	0.67696	Kgf/m ²
$\partial h_g / \partial P_s$	Gradiente da entalpia de vapor com relação a pressão de vapor na linha de vapor principal	-1.2E-08	Mj / Pa Kg
$\partial T_{sat} / \partial P_s$	Gradiente da temperatura de saturação com relação a pressão de vapor na linha de vapor principal	1.12E-05	°C / Pa
C_{p2}	Calor específico da água de alimetação	0.0054834	Mj/kg °C
C_v	Calor específico a volume constante no reaquecedor parte externa aos tubos	0.0019721	Mj/kg °C
V_r	Volume do Reaquecedor	566.3	m ³
V_c	Volume da caixa misturadora	5.66	m ³
H_{FW}	Entalpia na parte extena aos tubos do aquecedor 2	0.9401	Mj/kg
H_R	Calor Específico de vapor no Reaquecedor	0.09	Mj/kg °C
$(T_s - T_r)$	Diferença de temperatura inicial no reaquecedor	35.1	°C
ϵ_2	Coefficiente da válvula de desvio de vapor para o reaquecedor	2.117E-05	Kg/ s Pa
ϵ_0	Coefficiente da válvula da linha de vapor principal	8.1E-05	Kg/ s Pa
A_{k2}	Área na saída da caixa misturadora	1.43E-05	m ²
K_3	Área de saída da estrutura do reaquecedor	74.2	m ²
K_1	Constante usada na relação de Callender	7.415	Adm
K_2	Constante usada na relação de Callender	1.4967	Adm
R	Constante Universal dos Gases	4.60E-04	Mj/ Kg K
γ	Gradiente da energia interna no reaquecedor	1.2927	Adm
η_{lp}	Eficiência da turbina de baixa pressão	0.86	Adm
η_{hp}	Eficiência da turbina de alta pressão	0.86	Adm
J	Fator de Conversão	1	m N/ j
Ω	Frequência Angular inicial do Geradpr Elétrico	60	hz
g_c	Gravidade	9.81	m / s ²
NUTSG	Numero total de tubos em U nos 4 gerados de Vapor	16424	Adm

Tabela 7 - Parâmetros utilizados na modelagem do circuito secundário

Apêndice C

Parâmetros utilizados para a modelagem dinâmica de H. B. Robinson

Núcleo do Reator			
P_0	Potencia térmica nominal	2200	M_{wt}
λ_1	Constante de decaimento dos nêutrons retardados Grupo 1	0.0125	s^{-1}
λ_2	Constante de decaimento dos nêutrons retardados Grupo 2	0.0308	s^{-1}
λ_3	Constante de decaimento dos nêutrons retardados Grupo 3	0.114	s^{-1}
λ_4	Constante de decaimento dos nêutrons retardados Grupo 4	0.308	s^{-1}
λ_5	Constante de decaimento dos nêutrons retardados Grupo 5	1.114	s^{-1}
λ_6	Constante de decaimento dos nêutrons retardados Grupo 6	3.19	s^{-1}
Λ	Tempo médio de geração de nêutrons	0.000016	s^{-1}
β_1	Fração de nêutrons retardados Grupo 1	0.000209	Adm
β_2	Fração de nêutrons retardados Grupo 2	0.0014	Adm
β_3	Fração de nêutrons retardados Grupo 3	0.001309	Adm
β_4	Fração de nêutrons retardados Grupo 4	0.00272	Adm
β_5	Fração de nêutrons retardados Grupo 5	0.00074	Adm
β_6	Fração de nêutrons retardados Grupo 6	0.00031	Adm
β	Fração de nêutrons retardados Total	0.0067	Adm
α_f	Coefficiente de reatividade do Combustível (Doppler)	-1.30E-05	1 / °F
α_m	Coefficiente de reatividade do Moderador	-2.00E-04	1 / °F
α_p	Coefficiente de vazio da variação da pressão	-3.00E-07	1 / psi
c_{pF}	Condutividade térmica do combustível	0.059	B / °F lbm
C_{pc}	Condutividade térmica do moderador	1.39	B / °F lbm
M_f	Massa de combustível	222739	lbm
d	Densidade do líquido de refrigeração	52.3	lbm/ft ³
W_c	Vazão Mássica do líquido de refrigeração no circuito primário	28194	lbm/s
M_c	Massa de refrigerante no circuito Primário	23660	lbm
h	Coefficiente de transferência de calor total do combustível	2928	B / ft ² °F
h_1	Coefficiente de transferência de calor do combustível	0.049	B / ft ² °F
A_f	Área de transferencia total do combustivel no nucleo do reator	59900.0	ft ²
v	Velocidade do refrigerante	14.3	ft/s
Alt	Altura ativa	12	ft
R_s	Reatividade inserida a cada passo da barra de controle	0.315	Cents/min

Tabela 8 - Parâmetros utilizados na modelagem do núcleo do reator (HBR)

Tubulações e Plenos			
W_c	Vazão Mássica do líquido de refrigeração no circuito primário	28194	lbm/s
V_{up}	Volume do Pleno Superior do Vaso de Pressão	1376	lbm ³
V_{hl}	Volume da Perna Quente	250	lbm ³
V_{ip}	Volume do Pleno de Entrada do Gerador de Vapor	146.27	lbm ³
V_{op}	Volume do Pleno de Saida do Gerador de Vapor	146.27	lbm ³
V_{cl}	Volume da perna fria	500	lbm ³
V_{lp}	Volume do pleno Inferior do Vaso de Pressão do Reator	1791	lbm ³
d	Densidade do líquido de refrigeração	52.32	lbm/ft ³

Tabela 9 - Parâmetros utilizados na modelagem das tubulações e plenums (HBR)

Gerador de Vapor			
d	Denidade do refrigerante no primário	52.32	lbm/m ³
h_{pm}	Coefficiente de transferência de calor do primário para tubos Gv	0.5478	B/(ft ² °F)
A_{ms}	Área externa dos tubos do GV	51500	ft ²
T_{OD}	Diametro externo do tubo do GV	0.875	ft
T_{MT}	Espessura do tubo do Gv	0.05	ft
d_m	Denisidade do metal	530	lbm/ft ³
A_{pm}	Área interna dos tubos do GV	45614	ft ²
M_m	Massa do metal	50200	lbm/ft ³
V_{SGT}	Volume de água dentro dos tubos de GV	928	ft ³
C_m	Condutância térmica do metal	0.11	j/Kg*°C
(dT_{sat}/dP)	Varição da temperatura de saturação com a pressão	0.14	°F/psi
h_{ms}	Coefficiente de transferência de calor tubos Gv para secundário	0.5478	B/(ft ² °F)
W_{s0}	Vazão de vapor no GV	1036	lbm/s
cl	Coefficiente da válvula de vapor	1.3	lbm/ s psi
h_g	Entalpia do vapor que sai do Gerador de Vapor	1198.3	B/lbm
C_{p2}	Coefficiente térmico da agua do secundario	1.165	B/lbm°F
M_w	Massa de água no secundário	72736	lbm
(dh_f/dP)	Varição da entalpia com a pressão	0.057154	j/Kg pa
h_{FW}'	Entalpia da água de alimentação	1135	B/lbm
M_{ss}	Massa de vapor no secundário	5869.5	lbm
(dh_g/dP)	Varição da entalpia de vapor com a pressão	-0.350	B/lbm psi
(dh_{fg}/dP)	Varição da entalpia de saturação com a pressão	-0.200	B/lbm psi
v_{fg}	Volume específico de saturação	0.52470	ft ³ /lbm
(dv_g/dP)	Varição do volume específico de vapor com a pressão	-0.00071	ft ³ /lbm psi
A_{dw}	Área efetiva da Água dentro do GV	101.13	ft ²

Tabela 10 - Parâmetros utilizados na modelagem do gerador de vapor (HBR)

Sistema de Controle do Gerador de Vapor			
τ	Constante de tempo para o filtro do controlador PID	5	s
τ_1	Reset para sinal de nível	199.5	s
τ_2	Reset para sinal de vazão	17.87	s
k_1	Ganho Proporcional para o nível do sinal	75.4	Adm
k_2	Ganho Proporcional para o sinal de vazão	30.6	Adm
k	Ganho Proporcional para ajuste da posição da válvula	31.85	Adm
w_n	Frequência natural não amortecida do posicionamento da válvula	0.63	Adm
ζ	Taxa de amortecimento do posicionador da válvula	3.18	Adm

Tabela 11 - Parâmetros utilizados na modelagem do sistema de controle do gerador de vapor (HBR)

Pressurizador			
P_{p0}	Pressão inicial no pressurizador	2250	psi
P_{s0}	Pressão de vapor inicial no pressurizador	2250	psi
R	Constante real dos gases em grau rankine	53.35	ft lbf/lbm °R
V_{s0}	Volume inicial de vapor no pressurizador	720	ft ³
d	Densidade do líquido de refrigeração	52.35	lbm/ft ³
d_v	Densidade de vapor no pressurizador	6.37	lbm/ft ³
(dT_s/dP_s)	Temperatura de saturação por pressão de saturação	0.0645	°F/psi
(dT_w/dP)	Varição da temperatura da água com a pressão	0.0645	°F/psi
V_{pZR}	Volume do pressurizador	1080	ft ³
(dH_w/dP)	Varição da entalpia da água com a pressão	0.11	B/lbm psi
(dv_w/dP)	Varição do volume específico da água com a pressão	5.80E-06	ft ³ /lbm psi
H_{fg}	Entalpia de saturação da água no pressurizador	414	B/lbm
v_w	Volume específico da água no pressurizador	0.002698	ft ³ /lbm
H_{wi}	Entalpia da água na entrada no pressurizador	672.81	B/lbm
H_{w0}	Entalpia da água na saída no pressurizador	701.1	B/lbm
H_{sp0}	Entalpia inicial da água do Aspensor	574.36	B/lbm
θ_{C1}	Varição da densidade com a temperatura zona 1	0.1000	lbm/ft ³ °F
θ_{C2}	Varição da densidade com a temperatura zona 2	0.1000	lbm/ft ³ °F
θ_{UP}	Varição da densidade com a temperatura do Pleno Superior	0.1041	lbm/ft ³ °F
θ_{HL}	Varição da densidade com a temperatura da Perna Quente	0.1568	lbm/ft ³ °F
θ_{LP}	Varição da densidade com a temperatura Pleno Inferior	0.0711	lbm/ft ³ °F
θ_{CL}	Varição da densidade com a temperatura da Perna Fria	0.0550	lbm/ft ³ °F
θ_{IP}	Varição da densidade com a temperatura do Pleno de entrada do GV	0.0901	lbm/ft ³ °F
θ_{SGT}	Varição da densidade com a temperatura da água dentro dos tubos GV	0.0616	lbm/ft ³ °F
θ_{OP}	Varição da densidade com a temperatura outer plenun gv	0.0901	lbm/ft ³ °F
T_s	Temperatura de vapor no pressurizador	1113	°R
K	Constante de proporcionalidade do controlador PID do aquecedor	50	w/psi
τ_{aq}	Constante de tempo do controlador PID do aquecedor	900	s
τ_{ap}	Constante de tempo do controlador PID do aspensor	200	s
G_{sp}	Fator de ganho do controlador PID do Aspensor	75	lbm/psi

Tabela 12 - Parâmetros utilizados na modelagem do pressurizador (HBR)

Sistema da Válvula de Vapor			
τ	Constante de Tempo	0.2	s
k_g	Ganho	1.2706	1/Gw
R_g	Ganho na Frequência	3.00	Hz/Gw
D	Fator de Amortecimento	0.008333	Gw/Hz
M	Constante de inércia mecânica	0.08333	Gw s/Hz

Tabela 13 - Parâmetros utilizados na modelagem no sistema de controle da válvula de vapor (HBR)

Circuito Secundário			
w_1, w_2	Vazão Mássica que entra e sai da caixa misturadora	2652.865	lbm/s
w_2', w_3	Vazão Mássica que entra e sai do reaquecedor parte externa aos tubos	1911.376	lbm/s
w_{pr}, w_{pr}'	Vazão Mássica que entra e sai do reaquecedor parte interna dos tubos	122.1812	lbm/s
w_{ms}	Vazão mássica de água que sai do separador de mistura e vai para Aquecedor 2	239.8801	lbm/s
w_s, w_{fw}	Vazão Mássica da Água de Alimentação e vapor no Gerador de vapor em condição inicial	2777.753	lbm/s
w_2''	Vazão Mássica de Vapor que deixa a a turbina de alta pressão para o separador de mistura	2151.276	lbm/s
w_3'	Vazão Mássica de Vapor que deixa a a turbina de baixa pressão para o condensador	1495.842	lbm/s
w_{hp2}	Vazão Mássica de Água que sai do Aquecedor 1 para o Aquecedor 2	815.926	lbm/s
k_{bhp}	Fração de vapor extraída da Turbina de Alta Pressão para Aquecedor 2	0.1634	Adm
k_{blp}	Fração de vapor extraída da Turbina de Baixa Pressão para Aquecedor 1	0.2174	Adm
τ_{h1}	Constante de tempo de transferência de calor para Aquecedor 1	100	s
τ_{h2}	Constante de tempo de transferência de calor para Aquecedor 2	40	s
τ_{hp2}	Constante de tempo para Aquecedor 2	10	s
τ_{w3}	Constante de tempo para passagem do fluido na Turbina de Baixa Pressão	10	s
τ_{r2}	Constante de tempo para transferência de calor no Reaquecedor	4	s
τ_{r1}	Constante de tempo para passagem do fluido no Reaquecedor	3	s
τ_{w2}	Constante de tempo para passagem do fluido na Turbina de Alta Pressão	2	s
h_4'	Entalpia no ponto final isentrópico da Turbina de baixa pressão	958.4	B/lbm
h_r	Entalpia de vapor na saída do reaquecedor	1270.8	B/lbm
h_2	Entalpia de vapor na saída da turbina de alta pressão	1100.3	B/lbm
h_s, h_c	Entalpia de vapor na entrada e saída da caixa misturadora	1196.1	B/lbm
h_f	Entalpia da água no separador de mistura	338.75	B/lbm
h_{fg}	Calor Latente de vaporização da água no separador de mistura	857.7	B/lbm
h_2'	Entalpia no ponto final isentrópico do separador de mistura	1084.7	B/lbm
h_4	Entalpia de vapor que entra no Condensador	1002.1	B/lbm
ρ_2	Densidade de vapor que sai da turbina de alta pressão	1.83	lbm/ft ³
ρ_c	Densidade de vapor que sai da caixa misturadora	2.12	lbm/ft ³
ρ_R	Densidade de vapor que sai do reaquecedor	0.35	lbm/ft ³
P_R	Pressão na entrada no reaquecedor	1.111	psf
P_c	Pressão na saída da caixa misturadora	5.488	psf
$\partial h_g / \partial P_s$	Gradiente da entalpia de vapor com relação a pressão de vapor na linha de vapor principal	-3.5E-02	B/lbm psi
$\partial T_{sat} / \partial P_s$	Gradiente da temperatura de saturação com relação a pressão de vapor na linha de vapor principal	1.40E-01	°F / psi
C_{p2}	Calor específico da água de alimentação	1.14	B/lbm °F
C_v	Calor específico a volume constante no reaquecedor parte externa aos tubos	0.41	B/lbm °F
V_r	Volume do Reaquecedor	20000	ft ³
V_c	Volume da caixa misturadora	200	ft ³
H_{FW}	Entalpia na parte externa aos tubos do aquecedor 2	475	B/lbm
H_R	Calor Específico de vapor no Reaquecedor	21.6	B/lbm °F
$(T_s - T_r)$	Diferença de temperatura inicial no reaquecedor	54.48	°F
C_2	Coefficiente da válvula de desvio de vapor para o reaquecedor	0.2191	lbm/ s psi
C_0	Coefficiente da válvula da linha de vapor principal	1.2	lbm/ s psi
A_{k2}	Área na saída da caixa misturadora	207.82	ft ²
K_3	Área de saída da estrutura do reaquecedor	798.7	ft ²
K_1	Constante usada na relação de Callender	7,415	Adm
K_2	Constante usada na relação de Callender	1.497	Adm
R	Constante Universal dos Gases	85.78	(ft lbf/lbm °R)
γ	Gradiente da energia interna no reaquecedor	1.2927	Adm
η_{lp}	Eficiência da turbina de baixa pressão	0.86	Adm
η_{hp}	Eficiência da turbina de alta pressão	0.86	Adm
J	Fator de Conversão	778	(ft lbf) / B
Ω	Frequência Angular inicial do Gerador Elétrico	60	hz
g_c	Gravidade	32.2	(lbm ft / lbf s ²)
NUTSG	Numero total de tubos em U nos 4 gerados de Vapor	9780	Adm

Tabela 14 - Parâmetros utilizados na modelagem do circuito secundário (HBR)

Apêndice D

Matriz de estado do sistema dinâmico para Angra 2. Cada linha representa os coeficientes das variáveis uma determinada equação que foi apresentada no Capítulo 3 e que pode ser consultada pelo número entre parênteses no canto direito da tabela (16) e tabela (18).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-400	-6656	-46054	-46054	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.012	0.031	0.111	0.301	1.14	3.01	-0.029	0
2	88.22	-0.166	0.1661	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0.069	-2.044	0	0	0	0	0	0	1.975	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0.069	-1.906	-1.975	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0.3498	-0.35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	6.512	-6.512	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	3.045	-3.045	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	-3.138	0	0	3.138	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	2.522	-2.522	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0.271	-0.271	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0.815	0	0	0	-1.281	0.4653	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.133	-4.52692	3E-05	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63156.05	-2002	0	0	0	0	0	0	0	0
14	13.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.012	0	0	0	0	0	0	0
15	87.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.031	0	0	0	0	0	0
16	78.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.111	0	0	0	0	0
17	158.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.301	0	0	0	0
18	46.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.14	0	0	0
19	16.88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3.01	0	0
20	0	-39.83	39.835	1095.6	-601.7	762.5	325.6	412.3	-184.1	-330.3	302.4	-402.021	0	0	0	0	0	0	0	-0.43	5E-04
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.008	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.375	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	504.35	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.3	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1E-04	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2359	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2E-04	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4E-08	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4E-05	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 15 - Matriz de estado do sistema dinâmico para Angra 2 (Parte 1)

22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(11)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(17)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(19)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(18)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(22)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(20)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(34)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(35)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(21)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(23)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(36)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(37)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2603	0	838731.5	0	0	(38)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(16)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(16)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(16)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(16)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(16)
0	-126	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(24)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(32)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(15)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(33)
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(39)
0	0	-388.4	-4.007	0.707	12.64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(40)
0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(41)
0	0	0	0	0	0	0.056	-463	462.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(42)
0	0	0	0	0	0	0	-15.1	15.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(43)
0	0	0	0	0	0	0	-0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(44)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(45)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-78.1	-2859	0	29.331	155.7	0	0	0	0	0	0	1580737	0	0	(46)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.18	-50.4	0	0.069	0.368	0	0	0	0	0	0	1345.802	0	0	(47)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.109	3.997	-0.5	-0.041	-0.22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(48)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.725	-2.764	-14.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(49)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.29	-0.054	-2.42	0	5E-04	0	0	0	0	0	0	0	(50)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.33	0	0	0	0	0	0.333333	0	0	(51)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3425	50.23	-0.25	0	0	0	0	50.23068	0	0	(52)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.120	0.63	0	0	-0.1	0	0	0	0	0	0	0	(53)
0	0	-3E-06	-5E-04	0	0	0	0	0	0	0	0.0009	0.005	0	0	0	0	-0.01	0	0.006	0	0	0	(54)
0	0	-5E-04	-4E-04	0	0	0	0	0	0.103	3.783	0.465	-0.039	-0.21	0.244	0	0	4.559	-0.03	0	0	0	0	(55)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.004	0.14	0.017	-0.001	-0.01	0.009	0	0	0	0	-0.1	0	0	0	(56)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5	-6E-06	-2.11767	(57)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	341666.3	(58)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0.101	0	0.004	0.061	0	0	0.003	0	0	0	0	0	-0.1	(59)

Tabela 16 - Matriz de estado do sistema dinâmico para Angra 2 (Parte 2)

Apêndice E

Matriz de estado do sistema dinâmico para H. B. Robinson.

1	-400	-1788	-13750	-13750	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.012	0.031	0.111	0.301	1.14	3.01	412.5	0
2	0.072	-0.22	0.2228	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0.089	-2.472	0	0	0	0	0	0	2.383	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0.089	-2.294	-2.383	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0.3916	-0.39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	2.156	-2.16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	3.684	-3.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	-3.68	0	0	3.684	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	1.078	-1.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0.301	-0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0.042	0	0	0	-0.07	0.027	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.118	-4.51	0.3348	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.736	-0.4341	0	0	0	0	0	0	0	0
14	13.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.01	0	0	0	0	0	0	0
15	87.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.03	0	0	0	0	0	0
16	78.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.11	0	0	0	0	0
17	158.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.3	0	0	0	0
18	46.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.14	0	0	0
19	16.88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3.01	0	0
20	0	0.01	-0.01	-0.244	0.134	-0.17	-0.07	-0.09	0.041	0.074	-0.06	0.1	0	0	0	0	0	0	0	-0.41	1E-04
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.056	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.375	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	504.35	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.3	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2E-04	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4231	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-9E-04	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4E-06	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9E-04	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 17 - Matriz de estado do sistema dinâmico para H. B. Robinson (Parte 1)

22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(11)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(17)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(19)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(18)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(22)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(20)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(34)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(35)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(21)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(23)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(36)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(37)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.117	0	0.072	0	0	(38)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(16)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(16)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(16)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(16)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(16)
0	-0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(24)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(32)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(15)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(33)
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(39)
0	0	-388.4	-4.01	0.707	12.64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(40)
0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(41)
0	0	0	0	0	0	0.056	-463	462.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(42)
0	0	0	0	0	0	0	-15.1	15.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(43)
0	0	0	0	0	0	0	-0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(44)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(45)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-375	-939	0	413.3	173.5	0	0	0	0	0	0	53.47	0	0	(46)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.76	-10	0	0.838	0.352	0	0	0	0	0	0	0.086	0	0	(47)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	14.6	36.5	-0.5	-16.1	-6.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(48)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.096	-13.3	-5.51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(49)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.05	-0.09	-0.39	0	1E-04	0	0	0	0	0	0	0	(50)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.33	0	0	0	0	0	4E-04	0	0	(51)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.79	18.96	-0.25	0	0	0	0	0.02	0	0	(52)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13.92	5.755	0	0	-0.1	0	0	0	0	0	0	(53)
0	0	-8.E-04	-0.19	0	0	0	0	0	0	0	0	98.89	40.89	0	0	0	-0.01	0	1.395	0	0	0	(54)
0	0	-0.001	-0.17	0	0	0	0	0	46	115	0.904	-48.5	-20.4	0.458	0	0	0.022	-0.03	0	0	0	0	(55)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.503	3.76	0.03	-1.59	-0.67	0.015	0	0	0	0	-0.1	0	0	0	(56)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5	-6.35	-2.12	(57)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.342	(58)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.829	2.141	0	-2.31	-0.94	0	0	0.003	0	0	0	0	0	-0.1	(59)

Tabela 18 - Matriz de estado do sistema dinâmico para H. B. Robinson (Parte 2)