



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

## SIMULAÇÃO DINÂMICA DE UM PWR COM MODELAGEM DO SISTEMA PRIMÁRIO, PRESSURIZADOR E GERADORES DE VAPOR

Leandro Cardoso Olegario

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: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e  
Melo e Marco Antonio Bayout Alvarenga

Rio de Janeiro  
Setembro de 2016

Leandro Cardoso Olegario

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. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

---

Dr. Marco Antonio Bayout Alvarenga

---

Prof. Antonio Carlos Marques Alvim

---

Dr. Antonio Sérgio de Martin Alves

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO de 2016

Olegario, Leandro Cardoso

Simulação Dinâmica de um PWR com Modelagem do Sistema Primário, Pressurizador e Geradores de Vapor / Leandro Cardoso Olegario – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2016.

IX, 22 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo e Marco Antonio Bayout Alvarenga.

Projeto de Graduação – UFRJ/POLI/ Engenharia Nuclear, 2016.

Referencias Bibliográficas: p.

1. Análise de Segurança. 2. Dinâmica e Controle de Reatores 3. Instrumentação Nuclear 4. Metodologia. I. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo. II. Marco Antonio Bayout Alvarenga III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Nuclear. IV. Simulação Dinâmica de um PWR com Modelagem do Sistema Primário, Pressurizador e Geradores de Vapor.

*Existem coisas melhores adiante do que qualquer uma que deixamos para trás -*  
*(C. S. Lewis)*

## *Agradecimentos*

Agradeço primeiramente à Deus, pelo qual cheguei a este momento. Também aos meus pais, por serem modelos de vida e sempre me apoiarem, independentemente de qualquer coisa.

A todos os professores e profissionais do Programa de Engenharia Nuclear da UFRJ, que sempre foram atenciosos e preocupados em passar conhecimentos de forma clara e fazer a diferença na formação dos alunos. Em especial, ao Prof. Paulo Fernando Frutuoso e ao Dr. Marco Antonio, por terem sido fundamentais para realização deste trabalho.

A todos os meus colegas de curso e amigos, que me apoiaram ao longo deste anos, onde pude aprender muito e me tornar uma pessoa melhor.

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

## SIMULAÇÃO DINÂMICA DE UM PWR COM MODELAGEM DO SISTEMA PRIMÁRIO, PRESSURIZADOR E GERADORES DE VAPOR

Leandro Cardoso Olegario

Setembro/2016

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo e Marco Antonio Bayout Alvarenga

Curso: Engenharia Nuclear

Este trabalho apresenta a resposta dinâmica de diversas variáveis em reatores PWR, usando uma modelagem com controle dos aquecedores do pressurizador e desbalanço das vazões de água de alimentação e vapor dos geradores de vapor, quando submetidos a transientes de aumento da temperatura no pleno inferior do reator e retirada inadvertida de barras de controle. Essas respostas são então comparadas com outras provenientes de modelos diferentes presentes na literatura.

Foram utilizados dados dos reatores H. B. Robinson presentes na literatura, e de Angra 1, no seu Relatório Final de Análise de Seguranças. Os resultados mostraram que, para transientes que ofereçam pequeno desafio às variáveis de projeto, os controladores usados na modelagem suportam a retirada de energia do primário para manter o reator em condição segura. Já em transientes mais violentos, ou seja, que são mais desafiadores às variáveis de projeto, seria necessária a adição de mais variáveis de controle ao modelo. Os resultados de Angra 1 foram superiores aos de H. B. Robinson devido às suas características que facilitam a transferência de calor pelos geradores de vapor.

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 SYSTEM,  
PRESSURIZER, AND THE STEAM GENERATORS

Leandro Cardoso Olegario

September/2016

Advisors: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo e Marco Antonio Bayout Alvarenga

Course: Nuclear Engineering

This paper presents the dynamic response of several variables in PWR reactors, using a model with control of the pressurizer heaters and mismatch of the feed water and steam flows from the steam generators, when subjected to increasing temperature transients in the lower plenum of the reactor and inadvertent removal of control rods. These responses are then compared with others from different models present in the literature.

Data from the H. B. Robinson and Angra 1 plants were used. The results showed that for transients that provide little challenge to design variables, the controllers used in the model provided primary system energy removal to maintain the reactor in a safe condition. In more violent transients, that is, that are more challenging to design variables, it would be required adding more control variables to the model. The results in Angra 1 were superior to B. H. Robinson due to its features which facilitate heat transfer by the steam generators.

## Conteúdo

<i>1 INTRODUÇÃO</i> .....	1
<i>2 CONCEITOS BÁSICOS</i> .....	5
<i>3 MODELAGEM</i> .....	9
<i>4 ANÁLISE DE HBR</i> .....	16
<i>5 ANÁLISE DE ANGRA 1</i> .....	26
<i>6 CONCLUSÃO</i> .....	43
Referências .....	35
Apêndice I.....	39
Apêndice II .....	43



# Lista de Figuras

Figura 1	Esquema simplificado de um reator PWR.[1].....	1
Figura 2	Usina H. B. Robinson [9].....	5
Figura 3	Modelo básico de um nodo.....	6
Figura 4	Diagrama de um modelo nodal simples de um típico reator PWR.....	6
Figura 5	Modelo Nodal Completo.....	15
Figura 6	Resposta dinâmica da potência nuclear (Caso1).....	16
Figura 7	Resposta dinâmica da temperatura do combustível (Caso 2).....	17
Figura 8	Resposta dinâmica do segundo nodo de temperatura do refrigerante. (Caso 1).....	17
Figura 9	Resposta dinâmica da pressão de vapor. (Caso 1).....	18
Figura 10	Resposta dinâmica da temperatura do plenum inferior. (Caso 1).....	18
Figura 11	Resposta dinâmica da potência nuclear. (Caso 2).....	19
Figura 12	Resposta dinâmica da temperatura do combustível. (Caso 2).....	20
Figura 13	Resposta dinâmica da pressão de vapor. (Caso 2).....	20
Figura 14	Resposta dinâmica da temperatura na perna fria. (Caso 2).....	21
Figura 15	Resposta dinâmica da pressão do pressurizador. (Caso 2).....	21
Figura 16	Resposta dinâmica da potência dos aquecedores do pressurizador. (Caso 2).....	22
Figura 17	Resposta dinâmica da vazão de vapor. (Caso 2).....	22
Figura 18	Resposta dinâmica da vazão da água de alimentação. (Caso 2).....	23
Figura 19	Resposta dinâmica da temperatura da perna quente. (Caso 2).....	23
Figura 20	Resposta dinâmica da potência nuclear (Caso3).....	26
Figura 21	Resposta dinâmica da temperatura do combustível (Caso 3).....	27
Figura 22	Resposta dinâmica do segundo nodo de temperatura do refrigerante. (Caso 3).....	27
Figura 23	Resposta dinâmica da pressão de vapor. (Caso 3).....	28
Figura 24	Resposta dinâmica da temperatura do plenum inferior. (Caso 3).....	28
Figura 25	Resposta dinâmica da potência nuclear. (Caso 4).....	29
Figura 26	Resposta dinâmica da temperatura do combustível. (Caso 4).....	29
Figura 27	Resposta dinâmica da pressão de vapor. (Caso 4).....	30
Figura 28	Resposta dinâmica da temperatura na perna fria. (Caso 4).....	30
Figura 29	Resposta dinâmica da temperatura da perna quente. (Caso 4).....	31
Figura 30	Resposta dinâmica da pressão do pressurizador. (Caso 4).....	31
Figura 31	Resposta dinâmica da potência dos aquecedores do pressurizador. (Caso 4).....	32
Figura 32	Resposta dinâmica da vazão de vapor. (Caso 4).....	32
Figura 33	Resposta dinâmica da vazão da água de alimentação. (Caso 4).....	33

## Lista de Tabelas

Tabela 1- Dados de HBR [7] .....	39
Tabela 2- Dados de Angra 1 [15] .....	41
Tabela 3- Valores máximos das respostas dinâmicas do Caso 1 .....	43
Tabela 4- Valores máximos das respostas dinâmicas do Caso 2.....	44
Tabela 5- Valores máximos das respostas dinâmicas do Caso 3.....	45
Tabela 6- Valores máximos das respostas dinâmicas do Caso 4.....	46
Tabela 7- Valores máximos aproximados das respostas dinâmicas do modelo da ref. [6].....	47
Tabela 8- Valores máximos aproximados das respostas dinâmicas do modelo da ref. [14] .....	47

# Lista de Siglas

HBR – *H. B. Robinson Nuclear Plant*

PWR – *Pressurized Water Reactor*

CNEN – *Comissão Nacional de Energia Nuclear*

FSAR – *Final Safety Analysis Report*

LOCA – *Loss of Coolant Accident*

USNRC – *United States Nuclear Regulatory Commission*

CVCS - *Chemical and Volume Control System*

GV – *Gerador de Vapor*

LQR – *Linear Quadratic Controller*

DNBR – *Departure from Nucleate Boiling Ratio*

# Lista de Símbolos

Variável	Descrição
$\delta P$	Variação da potência do reator em relação ao seu valor estacionário
$P_0$	Nível de potência no estado estacionário inicial
$\lambda_i$	Constante de decaimento de nêutrons retardados para o i-ésimo grupo de nêutrons retardados
$\delta C_i$	Variação da potência normalizada de precursores em relação ao seu valor estacionário
$P_p$	Pressão do sistema primário
$\alpha_f$	Coefficiente de reatividade da temperatura do combustível
$\alpha_c$	Coefficiente de reatividade da temperatura do moderador
$\alpha_p$	Coefficiente de reatividade da pressão do refrigerante
$\delta T_{fi}$	Variação da temperatura do combustível no seu i-ésimo nodo em relação ao seu valor estacionário
$\delta T_{ci}$	Variação da temperatura do refrigerante no seu i-ésimo nodo em relação ao seu valor estacionário
$\delta \rho_{barra}$	Reatividade devido ao movimento de barra de controle
$\beta_i$	Fração de nêutrons retardados para o i-ésimo grupo de nêutrons retardados
$\beta$	Fração total de nêutrons retardados
$\Lambda$	Tempo de geração de nêutrons
$F_{fi}$	Importância de reatividade para mudanças de temperatura no i-ésimo nodo de combustível
$F_{ci}$	Importância de reatividade para mudanças de refrigerante no i-ésimo nodo de combustível
$\delta T_{fi}$	Temperatura média do combustível
$T_{c1i}$	Temperatura média do refrigerante no i-ésimo nodo de combustível
$T_{c2i}$	Temperatura na saída do refrigerante no i-ésimo nodo de combustível
$Q_{fi}$	Fração de potência do reator total gerada no i-ésimo nodo de combustível
$(MC_p)_{fi}$	Capacidade calorífica total do i-ésimo nodo de combustível
$(MC_p)_{ci}$	Capacidade calorífica total de todos os nodos de refrigerantes associados com o i-ésimo nodo de combustível
$U$	Coefficiente de transferência de calor do combustível para o refrigerante
$A_f$	Área de transferência de calor

$\tau$	Tempo de residência
$\delta T_{cin}$	Varição da temperatura de entrada no primeiro nodo de refrigerante em relação ao seu valor estacionário
$\delta T_{lp}$	Temperatura no plenum inferior do reator
$\delta T_{c1}$	Temperatura no nodo 1 de refrigerante
$\delta T_{c2}$	Temperatura no nodo 2 de refrigerante
$\delta T_{up}$	Temperatura no plenum superior do reator
$\delta T_{ip}$	Temperatura do refrigerante do primário no plenum de entrada do gerador de vapor
$\delta T_p$	Temperatura do nodo de refrigerante do primário no gerador de vapor
$\delta T_{op}$	Temperatura do refrigerante do primário no plenum de saída do gerador de vapor
$\delta T_{hl}$	Temperatura da perna quente
$\delta T_{cl}$	Temperatura da perna fria
$\delta q$	Variável de controle de ação integral
$\delta P_p$	Pressão do pressurizador
$\tau_{sg}$	Tempo de residência do refrigerante no gerador de vapor
$h_{pm}$	Coeficiente de transferência de calor do refrigerante do primário para o metal
$A$	Área de transferência de calor
$\delta T_m$	Temperatura dos tubos de metal
$M_p$	Massa de refrigerante do primário no gerador de vapor
$C_p$	Calor específico do refrigerante do primário
$h_{ms}$	Coeficiente de transferência de calor do metal para o refrigerante do secundário
$M_m$	Massa dos tubos de metal
$C_m$	Calor específico dos tubos de metal
$P_s$	Pressão de vapor
$T_{fw}$	Temperatura da água de alimentação
$W_{fw}$	Vazão de água de alimentação

$W_{s0}$	Vazão de vapor para a turbina
$T_{in}$	Temperatura do fluido na entrada
$\delta T$	Temperatura do fluido na seção
$\tau$	Tempo de residência do fluido
$T_s$	Temperatura do vapor
$R$	Constante dos gases ideais
$V_{s,0}$	Volume inicial de vapor
$M_{s,0}$	Massa inicial de vapor
$\rho_w$	Densidade da água
$h_{fg}$	Calor latente de vaporização
$\frac{\partial T_{sat}}{\partial P_s}$	Gradiente de temperatura em relação à pressão de vapor
$v_{w,0}$	Volume inicial específico da água
$h_{wi}$	Entalpia inicial da água de entrada
$h_{sp,0}$	Entalpia inicial do líquido entrando no <i>spray nozzle</i>
$W_{sp,0}$	Taxa de escoamento inicial do spray
$W_{w,0}$	Vazão inicial de água
$\varepsilon$	Erro
$\delta\rho_{barra}$	Reatividade inserida pela movimentação das barras de controle

## 1. INTRODUÇÃO

Durante a vida útil de uma instalação de geração potência nuclear, diversas vezes ocorrem transientes, ou desvios da operação normal, que devem ser corretamente monitorados para que possam ser corrigidos. Então, é preciso ter a maior precisão possível sobre o comportamento dinâmico da usina, garantindo maior eficiência e segurança, pois quando esses desvios não são detectados corretamente e eliminados, podem se acumular e ocasionar a ocorrência de transientes mais desafiadores para os parâmetros de projeto, colocando a planta em risco.

Os reatores a água pressurizada possuem um esquema que está simplificado na Figura 1. A água entra no reator pela perna fria, troca calor com o núcleo, segue pela perna quente ao gerador de vapor, onde troca calor com a água proveniente do secundário bombeada pela bomba de alimentação dos geradores de vapor. A água então se transforma em vapor, indo até a turbina e ao condensador.

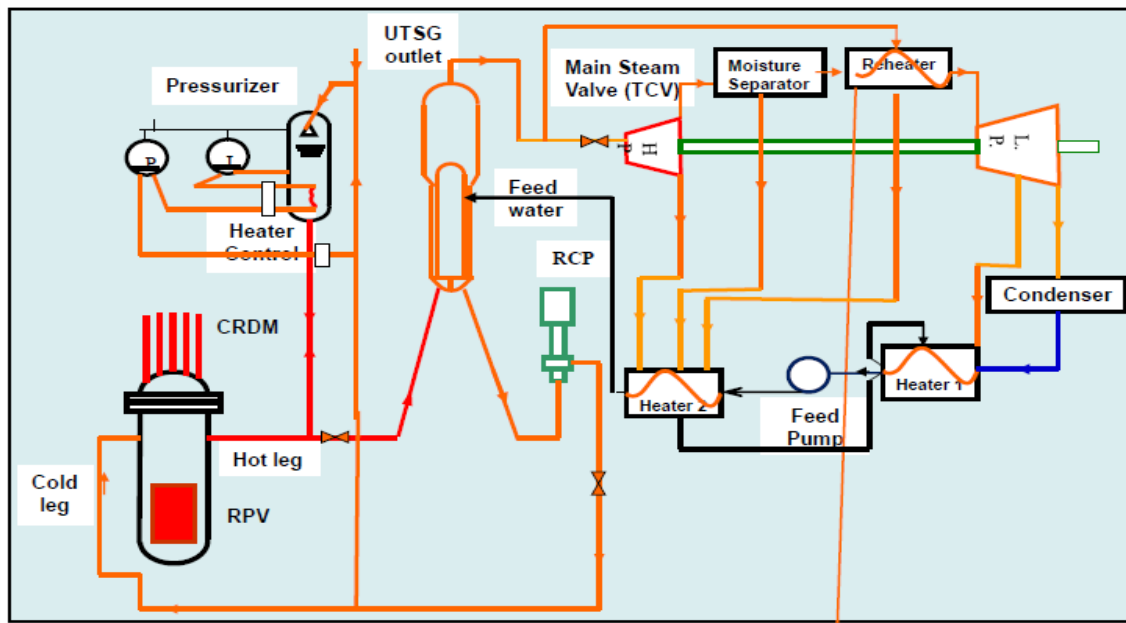


Figura 1 – Esquema simplificado de um reator PWR.[1]

O custo de implantação de uma usina nuclear é relativamente alto como descrito por [2]. O mesmo autor estima que o custo de capital de uma central nuclear varia entre 65% e 77% do custo nivelado de energia. Logo, é necessário que existam formas de controlar a operação da usina da forma mais eficiente possível, de modo a minimizar a influência de flutuações na geração de energia elétrica. Além disso, caso pequenas variações na operação normal do reator não sejam devidamente controladas, pode haver uma evolução de erros sucessivos que podem levar a transientes de maior intensidade e

até a acidentes graves.

No caso de PWRs, existem quatro sistemas principais de controle:

- Controle de Potência do Reator
- Controle de Vazão de Vapor da Turbina
- Controle de Nível e Pressão do Gerador de Vapor
- Controle de Nível e Pressão do Pressurizador
- Controle de Boro e do Inventário do primário pelo Sistema de Controle Químico e Volumétrico.

O controle de potência atua por meio da movimentação das barras de controle, o controle de vazão de vapor da turbina opera por meio da sua válvula de controle e das válvulas de desvio de vapor da turbina, o de nível do gerador de vapor pela vazão da água de alimentação que é inserida no gerador de vapor, o controle de pressão de vapor pela válvula de alívio do gerador de vapor, a remoção e injeção de refrigerante e boro pelo CVCS e o controle de pressão do sistema primário por aspersores, válvulas de alívio e aquecedores contidos dentro do pressurizador.

Segundo a norma CNEN-NE-1.04 [3], é necessário que o requerente à licença de uma instalação de usina nuclear apresente um Relatório Final de Análise de Segurança, onde conste toda a documentação relacionada aos cálculos e procedimentos importantes para a segurança da planta e que estejam em conformidade com a regulação em vigor. Esse relatório é baseado no *Standard Review Plan* [4] da agência reguladora americana, a NRC. Para se obter a Licença de Operação Inicial, deve-se apresentar ao órgão regulador metodologias de cálculo validadas e resultados compatíveis com os limites determinados por norma de engenharia, para cenários que variam desde pequenos desvios na operação normal do reator até uma grande ruptura do tipo guilhotina na tubulação do sistema primário, denominado de grande LOCA, ou mesmo acidentes severos com fusão do núcleo.

Existem diversas formas para avaliar o comportamento da instalação diante dessas anomalias, sendo um deles a nodalização, assim como o quase-estático, modal e o de síntese, como descrito por [5]. A nodalização é comumente usada para estudos de controle e dinâmica de reatores. É feita uma divisão dos sistemas em vários nodos ou volumes de forma que pode ser descrito por equações diferenciais ordinárias, o balanço de massa, energia e momento nestes volumes.

Os cálculos são feitos a partir de dados de projeto dos reatores utilizando equações de balanço de massa, energia e momento. Analisando como os componentes de reatores



a água pressurizada são organizados, são criadas equações específicas para cada nodo representando os principais componentes. Quanto mais componentes incluídos, maior a precisão do modelo. Ao final, os cálculos dos nodos são acoplados para a análise da instalação como um todo. A simulação dinâmica tem como objetivo principal a validação dos limites de projeto em diversos cenários operacionais e dar entrada com os resultados da simulação ao projeto dos controladores analógicos e digitais, verificando o desempenho destes controladores, incluindo os estudos de estabilidade dinâmica.

O modelo utilizado neste trabalho utiliza controladores de vapor e água de alimentação dos geradores de vapor, com o objetivo de testar suas capacidades de remover energia do sistema primário sem as contribuições para o limite de pressão dos aspergidores do pressurizador e para o limite de potência pelas barras de controle.

As simulações foram feitas utilizando a forma linearizada das equações dinâmicas resultante do acoplamento das equações cinéticas com as equações termo-hidráulicas, do núcleo do reator e do sistema primário de refrigeração, que serão detalhadas nas próximas seções, geradas por equações diferenciais calculadas em torno do ponto de operação considerado. Então, a solução é encontrada resolvendo as seguintes equações de estado representativas das equações dinâmicas:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx + Du \quad (2)$$

Onde,

$x$  é o vetor de estado contendo as variáveis de estado do sistema primário (núcleo + circuito de refrigeração);

$A$  é uma matriz de estado do sistema dinâmico, cujos termos são idênticos aos coeficientes das variáveis de estado nas equações diferenciais lineares e que são formados pelos parâmetros que definem os processos físicos dos balanços de massa, energia e momento;

$B$  é um vetor ou matriz de perturbação que define qual é a variável de perturbação no sistema associada a uma determinada equação diferencial;

$u$  é o escalar ou vetor contendo valores que definem a intensidade desta perturbação.

$y$  é um vetor de saída em função das variáveis de estado;

C é um vetor ou matriz que define a saída em função das instrumentações de medida das variáveis de estado.

D é um vetor ou matriz de incidência direta da perturbação na saída.

Foi usado o programa MATLAB®, para obter o comportamento de diversas variáveis ao longo do tempo. Os resultados obtidos foram comparados com os da literatura para verificar a utilidade do presente método.

Neste trabalho C é uma matriz unitária e  $D=0$ , portanto  $y=x$ . B é um vetor com valor unitário na primeira linha e u é uma perturbação de reatividade. A necessidade de se definir C e D surge pelo fato da obrigação de se identificar A, B, C e D nos comandos do MATLAB®.

Estudos anteriores, entre eles [6] e [7], estabelecem modelos lineares relativamente similares para a avaliação do controle dinâmico do reator da usina de H. B. Robinson. A vantagem dessa escolha de modelagem se dá pelo fato de diminuir a sensibilidade à variação de parâmetros em torno dos seus valores nominais, como explicado em [6]. Este trabalho se propõe a combinar pequenas modificações desses estudos e comparar a eficácia das medidas tomadas em cada um deles e de cenários propostos por outros trabalhos.

As duas usinas estudadas neste projeto são: H. B. Robinson (HBR) no estado da Carolina do Norte nos Estados Unidos e Angra 1 no estado do Rio de Janeiro, no Brasil. A usina de H. B. Robinson foi escolhida pelos fatos de diversos trabalhos já presentes na literatura oferecerem acesso aos seus dados. Angra 1 foi escolhida por ser um reator com características parecidas às de HBR, com seus sistemas nucleares produzidos pelo mesmo fabricante e ser um reator de água pressurizada com tecnologia similar, e por ter dados acessíveis através do seu FSAR.

O reator *Westinghouse* da usina HBR analisado é um reator PWR de 3 *loops*, ou seja, possui 3 geradores de vapor com tubos em U verticais, com potência térmica de 2200 MWt e 739 MW elétricos. O reator de Angra 1 também é do tipo PWR, mas com 2 *loops* e 1882 MWt de potência. Os dois seguem as principais características de projeto descritas na ref. [8].

Ao considerar um número maior de variáveis e hipóteses diferentes, é possível alcançar uma resposta dinâmica de melhor qualidade e prover ganhos na eficiência de operação da usina e na segurança do projeto. A partir daí, é possível estabelecer uma análise comparativa plausível do comportamento da usina de Angra 1.



Figura 2: Usina H. B. Robinson [9].

## 2. CONCEITOS BÁSICOS

Neste capítulo, a nodalização para cálculos de dinâmica de reatores é explicada de forma mais detalhada, assim como o processo de aquisição de dados, fundamentação e organização das equações utilizadas.

Como já mencionado, a nodalização consiste em dividir os sistemas e componentes da planta em nodos, ou aglomerados de massa, usando equações de balanço de massa, energia e momento. Pode ser utilizado para cálculo de diferentes reatores, como exemplificado em [10]. A partir do desenvolvimento das equações de balanço, elas são acopladas como relações de transferência de calor e massa com equações da cinética pontual para modelar o núcleo do reator. Este acoplamento é feito através dos coeficientes de reatividade do moderador e do combustível, considerando os efeitos de variação de temperatura e as equações de balanço. Esse acoplamento é o que constitui a dinâmica da instalação, sendo a entrada para o projeto e desempenho dos sistemas de controle.

Neste trabalho foram considerados para nodalização somente os componentes do sistema de refrigeração do reator, a saber, o reator e seu núcleo, o gerador de vapor, o pressurizador e as tubulações de perna fria e perna quente. O sistema secundário de vapor não foi considerado em razão de pertinência para comparação com resultados já presentes na literatura, mas pode ser proposta de continuação deste trabalho.

Para reduzir a complexidade dos cálculos, é necessário estabelecer hipóteses condizentes com o que se quer estabelecer, a fim de simplificar a importância de processos físicos e fatores geométricos. A ref. [11] lista as hipóteses básicas para o modelo nodal, que são:

- Modelo unidimensional para transferência de calor e termo-hidráulica
- Os sistemas considerados são bem isolados do ambiente exterior.
- A água é um fluido incompressível.

- Existe condição de equilíbrio entre água e vapor em modelos de escoamento bifásico.
- Os coeficientes de transferência de calor são constantes.
- Fatores de atrito de fluido são constantes para escoamentos através de tubulações e regiões do gerador de vapor.

Um exemplo de nodo e uma representação simples de uma divisão nodal de reatores PWR estão nas Figuras 3 e 4, respectivamente. As propriedades de cada nodo são consideradas uniformes com a temperatura no nodo sendo a mesma da saída. É assumido que toda a troca de calor é feita na direção axial. O fluxo de massa de refrigerante no núcleo é constante. As equações que governam o modelo são as de balanço de massa, energia e momento.

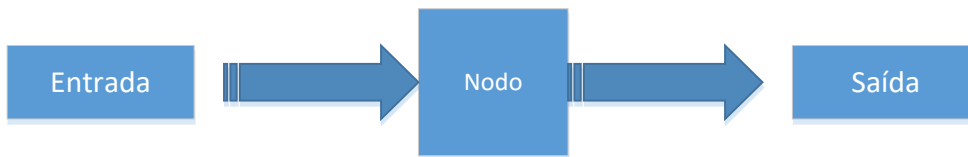


Figura 3: Modelo básico de um nodo.

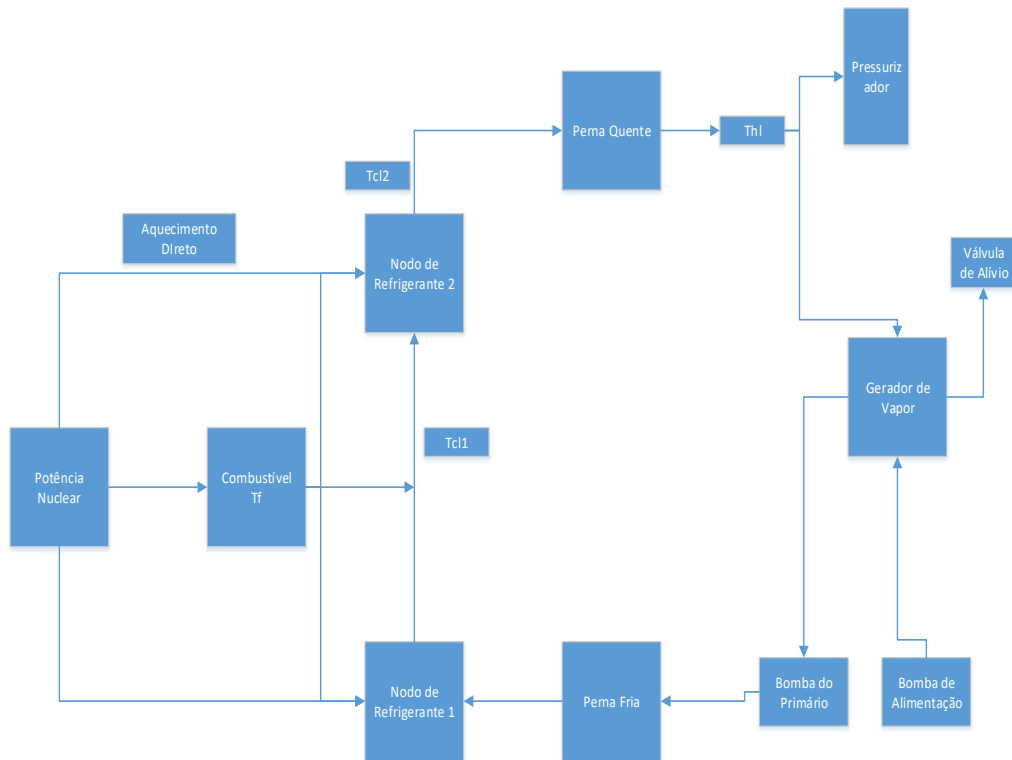


Figura 4: Diagrama de um modelo nodal simples de um típico reator PWR.

As equações de balanço de massa, momento e energia têm a seguinte forma geral:

### 2.1. Equação de Conservação de Massa

A equação é representada por:

$$\frac{dm}{dt} = W_{in} - W_{out} \quad (3)$$

onde:

$W_{in}$  = vazão mássica de massa entrando no volume de controle

$W_{out}$  = vazão mássica de massa saindo do volume de controle

$m$  = massa no volume de controle no instante  $t$

### 2.2. Equação de Balanço de Energia

A forma simplificada da equação é dada por:

$$\frac{dU}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (4)$$

onde:

$Q_{in}$  = taxa de escoamento de energia entrando no volume de controle

$Q_{out}$  = taxa de escoamento de energia saindo do volume de controle

$U$  = energia interna do volume de controle no instante  $t$

### 2.3. Equação de Balanço de Momento

Considerando uma única direção:

$$\frac{d(mv)}{dt} = F_p + F_d + F_g \quad (5)$$

onde:

$F_p$  = forças devido à pressão atuando no volume de controle

$F_d$  = força de atrito paralela ao escoamento do fluido

$F_g$  = força da gravidade

$v$  = velocidade do fluido

$m$  = massa no volume de controle no instante  $t$

O modelo usado também é baseado na linearização de equações diferenciais ordinárias, pois contribui para simplificar os cálculos e permitir a análise do comportamento dinâmico e estabilidade do sistema por meio de técnicas de sistemas lineares já consagradas na literatura básica. Como explicado em [11], um modelo bem aproximado do gerador de vapor é extremamente complexo devido ao seu comportamento termo-hidráulico para modelagem dos tubos de refrigeração com água do sistema

primário, dos espaços de vapor, do fluido do sistema secundário de vapor e a não-linearidade dos fenômenos como, por exemplo, o “encolhe e incha”.

Esse fenômeno acontece à baixas potências e tende a causar efeitos contrários ao que se espera ao se adicionar água de alimentação ao GV. Por exemplo, quando há níveis inapropriados de vapor no GV, mais água de alimentação pode diminuir o nível de água. Portanto, é necessário desenvolver um modelo linear adequado de forma a projetar um controlador eficiente.

O método de linearização é baseado na perturbação das variáveis ao redor de um valor constante de referência no tempo. Por exemplo, a seguinte equação quando perturbada toma a forma de:

$$A = BC \tag{6}$$

$$A + \delta A = (B_0 + \delta B)(C_0 + \delta C) \tag{7}$$

Ao eliminar o produto das perturbações por serem pequenas e subtrair os pontos de referência temos:

$$\delta A = C_0 \delta B + B_0 \delta C \tag{8}$$

### 3. MODELAGEM

Neste capítulo as equações linearizadas utilizadas e calculadas são apresentadas, aplicando-se as equações de balanço de massa, energia e momento nos diversos nodos, considerando as fases líquida e de vapor separadas em cada componente. Os valores utilizados para os cálculos estão listados no Apêndice I. O esquema nodal completo é apresentado na Figura 5.

As equações linearizadas são as seguintes:

3.1. Núcleo - Usando as equações da cinética pontual e de balanço de energia, o reator é modelado com um nodo para o combustível e dois para o refrigerante, o que permite uma melhor aproximação devido às variações de temperatura do refrigerante na entrada e na saída do reator, ou seja, na perna fria e na perna quente, temos:

#### 3.1.1. Potência

$$\frac{d\delta P}{dt} = \frac{-\beta}{\Lambda} \delta P + \sum_i \lambda_i \delta C_i + \frac{\alpha_f P_0}{\Lambda} \sum_{\substack{\text{nodos} \\ \text{de comb.}}} F_{fi} \delta T_{fi} + \frac{\alpha_p P_0}{\Lambda} \delta P_p + \frac{P_0}{\Lambda} \delta \rho_{barra} + \frac{\alpha_c P_0}{\Lambda} \sum_{\substack{\text{nodos de} \\ \text{refrig.}}} F_{ci} \delta T_{ci} \quad (9)$$

#### 3.1.2. Potência associada aos grupos de precursores

$$\frac{d\delta C_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} \delta P - \lambda_i \delta C_i \quad (10)$$

#### 3.1.3. Temperatura do refrigerante e do combustível

$$\frac{d\delta T_{fi}}{dt} = \frac{Q_{fi}}{(MC_p)_{fi}} \delta P - \left( \frac{UA_f}{(MC_p)_{fi}} \right) (\delta T_{fi} - \delta T_{c1i}) \quad (11)$$

$$\frac{d\delta T_{c1i}}{dt} = \left( \frac{UA_f}{(MC_p)_{ci}} \right) (\delta T_{fi} - \delta T_{c1i}) - \frac{2}{\tau} (\delta T_{c1i} - \delta T_{cin}) \quad (12)$$

$$\frac{d\delta T_{c2i}}{dt} = \left( \frac{UA_f}{(MC_p)_{ci}} \right) (\delta T_{fi} - \delta T_{c1i}) - \frac{2}{\tau} (\delta T_{c2i} - \delta T_{c1i}) \quad (13)$$

$$\frac{1}{\tau} = \left( \frac{W_p}{M_p} \right)_{\text{núcleo}} \quad (14)$$

### 3.2. Pressurizador

#### 3.2.1. Pressão no pressurizador

O pressurizador tem fase líquida e de vapor e utiliza neste modelo equações de balanço mais a equação de gases perfeitos. Como descrito na ref. [7], não foram encontrados dados para o controlador de pressão de HBR. No entanto, foram usados dados da usina de Sequoyah. Esse modelo somente utiliza os aquecedores de operação normal. A equação diferencial do pressurizador é a seguinte [16]:

$$\frac{d\delta P_p}{dt} = B_1 \delta P_p + B_2 \delta W_w + B_3 \delta q + B_4 \delta W_{sp} + B_5 \delta T_{sp} + B_6 \delta T_w \quad (15)$$

Sendo,

$$\frac{d\delta W_w}{dt} = \sum_{i=1}^N V_i \gamma_i \frac{d\delta T_{ci}}{dt} \quad (16)$$

$\sum_{i=1}^N V_i \gamma_i \frac{d\delta T_{ci}}{dt}$ , sendo a expansão/contração de volume no sistema primário em função das variações de temperatura no circuito de refrigeração.

Não é utilizado aspergidor para controlar pressão, somente aquecedores, e consideramos pequenas as variações na temperatura de saturação, temperatura da água do *spray* e temperatura da água na linha de surto do pressurizador com a perna quente, com o intuito de simplificar o modelo e verificar se somente com as vazões de água de alimentação e de vapor é possível retirar energia do reator, além de obter uma comparação mais plausível com a literatura usada.

Será verificado que, para transientes que apresentam menores desafios para o projeto, não haverá um aumento de pressão suficiente para desligar o reator ao utilizar o modelo sem o sistema de aspergidor do pressurizador, então, restando três variáveis de estado:

$$B_1 = \frac{D}{C}; B_2 = \frac{E}{C}; B_3 = \frac{1}{C}; B_4 = \frac{F}{C} = \delta W_{sp}; B_5 = \frac{G}{C} = \delta T_{sp}; B_6 = \frac{H}{C} = \delta T_w \quad (17)$$

$$C = \frac{(h_{fg,0} + P_{p,0} v_{w,0})B}{A(A-B)} \quad (18)$$

$$A = \frac{RT_s}{(V_{s,0} - RM_{s,0} \left( \frac{\delta T_{sat}}{\delta P_s} \right))} \quad (19)$$

$$B = \frac{P_{s,0}}{\rho_w (V_{s,0} - RM_{s,0} \left( \frac{\delta T_{sat}}{\delta P_s} \right))} \quad (20)$$

O índice 0 significa condição inicial em torno do ponto de equilíbrio.



$$D = [W_{w,0}\{\alpha + \beta\} + W_{sp,0}\{\alpha + \beta\} - W_{w,0}\{\beta\}] \quad (21)$$

$$\alpha = -C_p \left( \frac{\delta T_w}{\delta P_p} \right) \quad (22)$$

$$\gamma = -h_{w,0} + P_{p,0} v_{w,0} + \frac{C}{A} \quad (23)$$

$$\beta = P_{p,0} \left( \frac{\delta v_w}{\delta P_p} \right) + v_{w,0} \quad (24)$$

$$E = h_{w,i} + \gamma \quad (25)$$

$$F = h_{sp,0} + \gamma \quad (26)$$

$$H = C_p W_{w,0} \quad (27)$$

$$G = C_p W_{sp,0} \quad (28)$$

Por exemplo, após a inserção dos dados, a equação 15 fica para os casos de HBR:

$$\begin{aligned} \frac{d\delta P_p}{dt} = & 0.0207\delta T_f - 0.0207\delta T_{c1} + 0.0103\delta T_{c2} + 0.240\delta T_{up} - 0.130\delta T_{ip} - \\ & 0.509\delta T_p + 0.634\delta T_m - 0.116\delta T_{op} + 0.121\delta T_{lp} - 0.279\delta T_{hl} + 0.0235\delta T_{cl} - \\ & 0.0106\delta P_p - 0.00213\delta q \end{aligned} \quad (29)$$

### 3.2.2. Variável de ação de controle integral dos aquecedores

$$\delta q = k(\delta P_p + \frac{1}{\tau_1} \int \delta P_p + \tau_2 \frac{d\delta P_p}{dt}) \quad (30)$$

$$\frac{d\delta q}{dt} = k \frac{d\delta P_p}{dt} + \frac{k}{\tau_1} \delta P_p + \frac{k\tau_2 d^2 \delta P_p}{dt^2} \quad (31)$$

Desprezando a derivada de primeira e segunda ordem, para utilizar somente um controlador integral:

Com  $k = -50$  kW/psi e  $\tau_1 = 900$ s, temos (HBR):

$$\frac{d\delta q}{dt} = 0.0556 \delta P_p \quad (32)$$

3.3. Gerador de Vapor – O gerador é dividido em três nodos, o fluido do primário, os tubos de metal e o volume do secundário dividido em 2 partes, líquido e vapor.

3.3.1. Temperatura do refrigerante do primário no gerador de vapor [17]:

$$\frac{d\delta T_p}{dt} = -\frac{(hA)_{pm}}{M_p c_p} (\delta T_p - \delta T_m) - \frac{1}{\tau_{sg}} \delta T_p + \frac{1}{\tau_{sg}} \delta T_{lp} \quad (33)$$

$$\tau_{sg} = \frac{M_{sgw}}{W_p} \quad (34)$$

3.3.2. Temperatura do metal dos tubos do gerador de vapor [17]:

$$\frac{d\delta T_m}{dt} = \frac{(hA)_{pm}}{M_m c_m} (\delta T_p - \delta T_m) - \frac{(hA)_{ms}}{M_m c_m} \left[ \delta T_m - \left( \frac{\delta T_{sat}}{\delta P_s} \right) \delta P_s \right] \quad (35)$$

3.3.3. Pressão de vapor

$$\frac{d\delta P_s}{dt} = D_1 \delta P_s + D_2 \delta T_m + D_3 \delta T_{fw} + D_4 \delta W_{fw} + D_5 \delta W_{s0} \quad (36)$$

$$D_1 = \frac{D}{C}; D_2 = \frac{E}{C}; D_3 = \frac{F}{C}; D_4 = \frac{G}{C}; D_5 = \frac{H}{C} \quad (37)$$

$$A = \frac{RT_s}{(V_{s,0} - RM_{s,0} \left( \frac{\delta T_{sat}}{\delta P_s} \right))} \quad (38)$$

$$B = \frac{P_{s,0}}{\rho_w (V_{s,0} - RM_{s,0} \left( \frac{\delta T_{sat}}{\delta P_s} \right))} \quad (39)$$

$$C = \left( \frac{C_p M_w \left( \frac{\delta T_{sat}}{\delta P_s} \right) + h_s A}{C_p T_s - h_s \frac{B}{A}} - \frac{1}{A-B} \right) \quad (40)$$

$$D = \left( \frac{(h_{ms} A_{ms} + W_{fw} C_p) \left( \frac{\delta T_{sat}}{\delta P_s} \right)}{C_p T_s - h_s \frac{B}{A}} \right) \quad (41)$$

$$E = \frac{h_{ms} A_{ms}}{C_p T_s - h_s \frac{B}{A}} \quad (42)$$

$$F = \frac{W_{fw} C_p}{C_p T_s - h_s \frac{B}{A}} \quad (43)$$

$$G = \frac{1}{\left( 1 - \frac{B}{A} \right)} \quad (44)$$

$$H = \frac{h_s}{C_p T_s - h_s \frac{B}{A}} - \frac{1}{\left( 1 - \frac{B}{A} \right)} \quad (45)$$

As variáveis de estado  $W_{fw}$  e  $W_{s0}$  serão usadas como variáveis de controle do nível e pressão do gerador de vapor.

3.4. Plenos e tubulações – São seis nodos para os plenos e tubulações: Perna quente, perna fria, plenums superior e inferior do reator, entrada e saída do gerador de vapor.

Os perfis de temperatura para os plenos são os seguintes:

$$\frac{d\delta T}{dt} = \frac{1}{\tau} \delta T_{in} - \frac{1}{\tau} T_{out} \quad (46)$$

Sendo  $\tau$  = tempo de trânsito do refrigerante em dado nodo

$$\tau = \left( \frac{M_{nodo}}{W_{nodo}} \right) \quad (47)$$

3.5. Controles da vazão de água de alimentação e de vazão de vapor

Como demonstrado na ref. [12], a vazão de vapor pode ser considerada proporcional à pressão de vapor e a vazão de vapor igual à vazão da água de alimentação, ou seja, o controle de pressão se dá pela válvula de alívio através do coeficiente  $c_f$ , e o controle do nível do gerador de vapor se faz pela equivalência entre as vazões de vapor e de água de alimentação, portanto:

$$W_{s,0} = \varepsilon (P_s - P_T)^{1/2} \quad (48)$$

E na forma linearizada:

$$\delta W_{s,0} = \varepsilon' (\delta P_s - \delta P_T)^{1/2} \quad (49)$$

$\delta P_T$  é a variação de pressão no primeiro estágio da turbina

$$\delta P_T = 0$$

$$\frac{d\delta W_{s,0}}{dt} = \frac{d\delta W_{fw}}{dt} = c_f \frac{d\delta P_s}{dt} \quad (50)$$

E  $c_f$  é dado por:

$$c_f = \varepsilon' = \frac{\varepsilon^2}{2W_{s,0}} \quad (51)$$

Após a inserção de valores nas equações anteriores, elas são acopladas em forma de matriz para que se forme uma equação diferencial, que é a equação de espaço de estado. Ela possui a seguinte forma:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx + Du \quad (2)$$

Onde:

x=Vetor de estado das variáveis

A=Matriz do sistema

B=Matriz de perturbações no sistema

u=Vetor de perturbações externas no sistema ou de variáveis de controle

y=vetor de saída

C=matriz de saída = I

D=matriz de transferência direta = 0

No caso do presente trabalho, as variáveis de controle fazem parte das variáveis de estado. Para resolver esse problema foi criado um código no programa MATLAB®, utilizando o comando “lsim” que simula a resposta de sistemas lineares à entradas de dados [13]. O modelo nodal completo se encontra na próxima página.

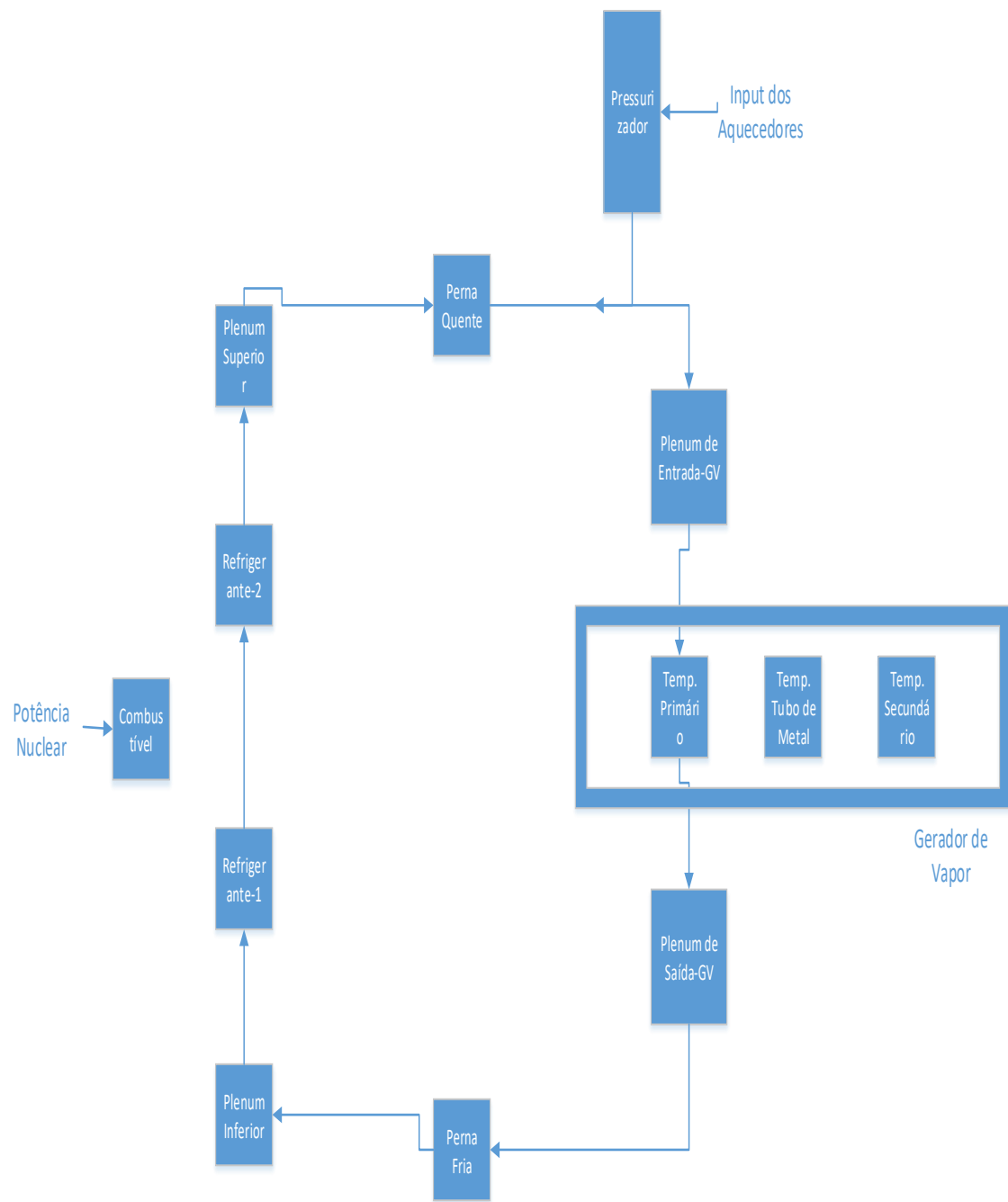


Figura 5: Modelo Nodal Completo

#### 4. ANÁLISE DE HBR

Os dados para essa análise foram retirados de [6]. O coeficiente de proporcionalidade para o cálculo das vazões é apresentado em [12]. Foram utilizados seis grupos de precursores mais todas as variáveis detalhadas no capítulo anterior, num total de 23. Após os cálculos, os resultados foram comparados com outros trabalhos da literatura que usaram os mesmos dados, porém com modelos diferentes. Esse capítulo apresenta os resultados obtidos.

A ref. [6] utilizou um modelo sem controle de nível e pressão do gerador de vapor e sem pressurizador, com apenas um grupo de precursores e, em seguida, simulou uma variação de 2°F na temperatura do plenum inferior do reator, porém utilizando um controlador do tipo LQR, que pode ser implantado digitalmente. Ao introduzir a mesma perturbação no modelo desse trabalho, sendo as variáveis expressas em termos de suas variações, os seguintes resultados foram obtidos:

##### 4.1.Caso 1 - Acréscimo de 2°F na temperatura do plenum inferior

###### 4.1.1. Potência Nuclear

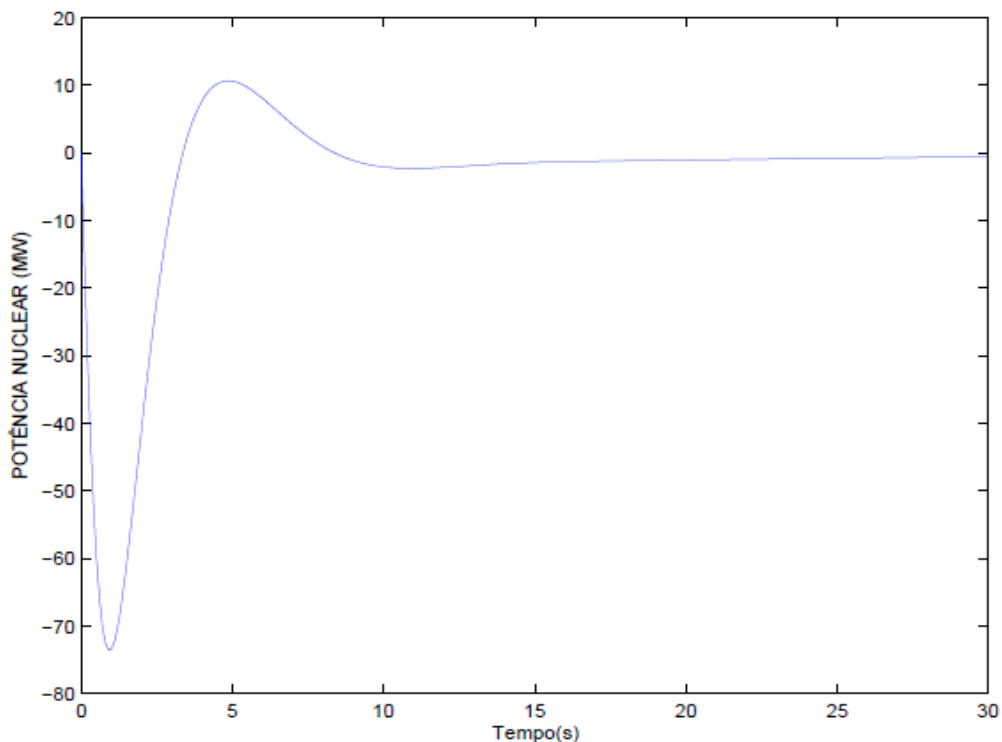


Figura 6: Resposta dinâmica da potência nuclear (Caso1)

#### 4.1.2. Temperatura do Combustível

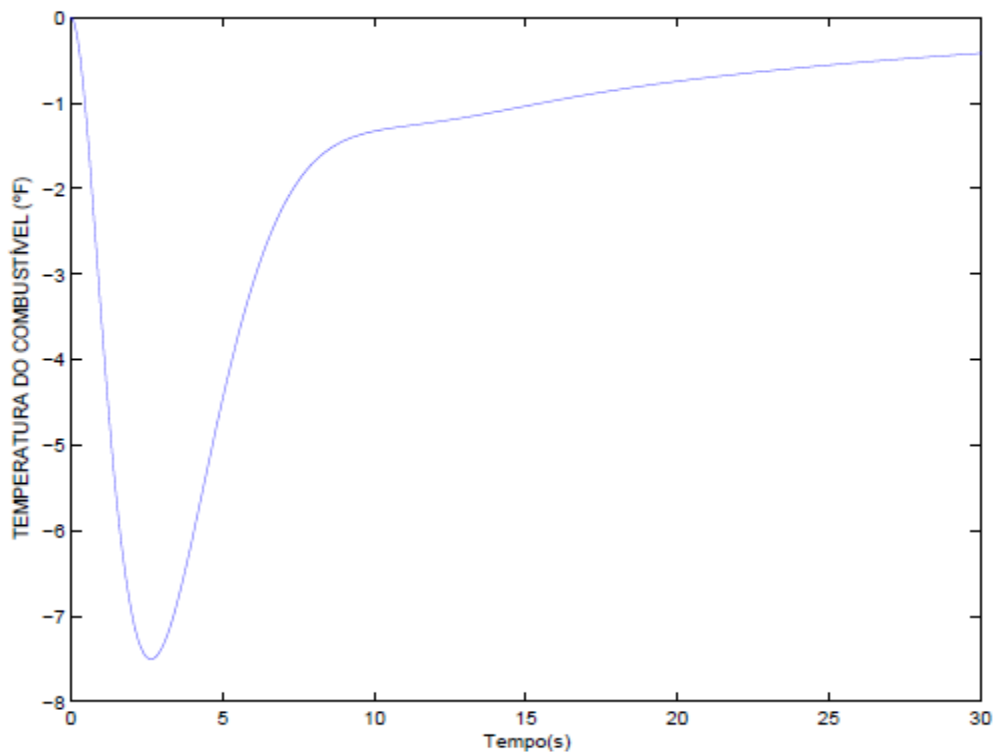


Figura 7: Resposta dinâmica da temperatura do combustível (Caso 1)

#### 4.1.3. Temperatura do refrigerante no nodo 2

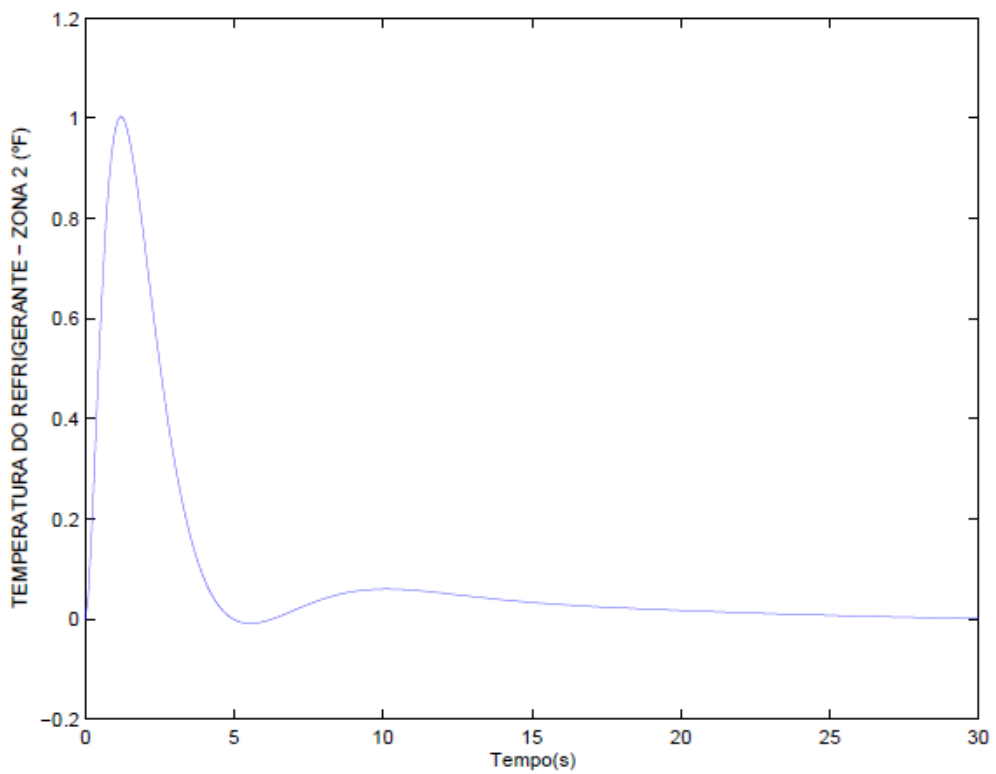


Figura 8: Resposta dinâmica do segundo nodo de temperatura do refrigerante.  
(Caso 1)

#### 4.1.4. Pressão de vapor

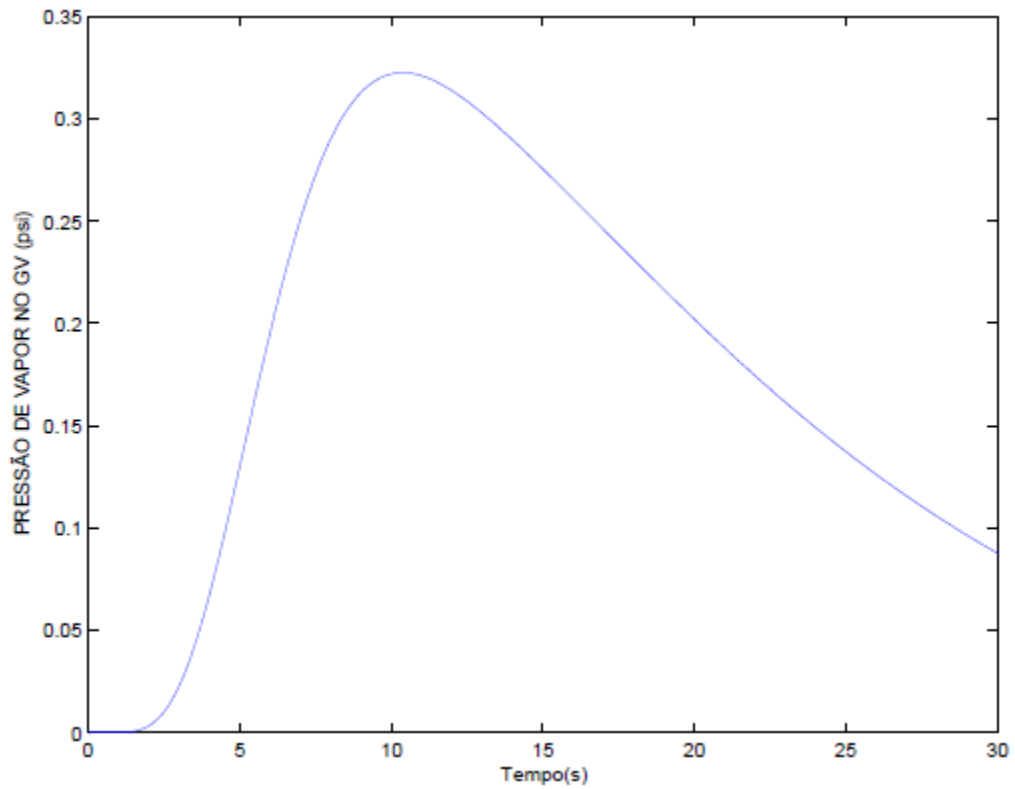


Figura 9: Resposta dinâmica da pressão de vapor. (Caso 1)

#### 4.1.5. Temperatura do Plenum Inferior

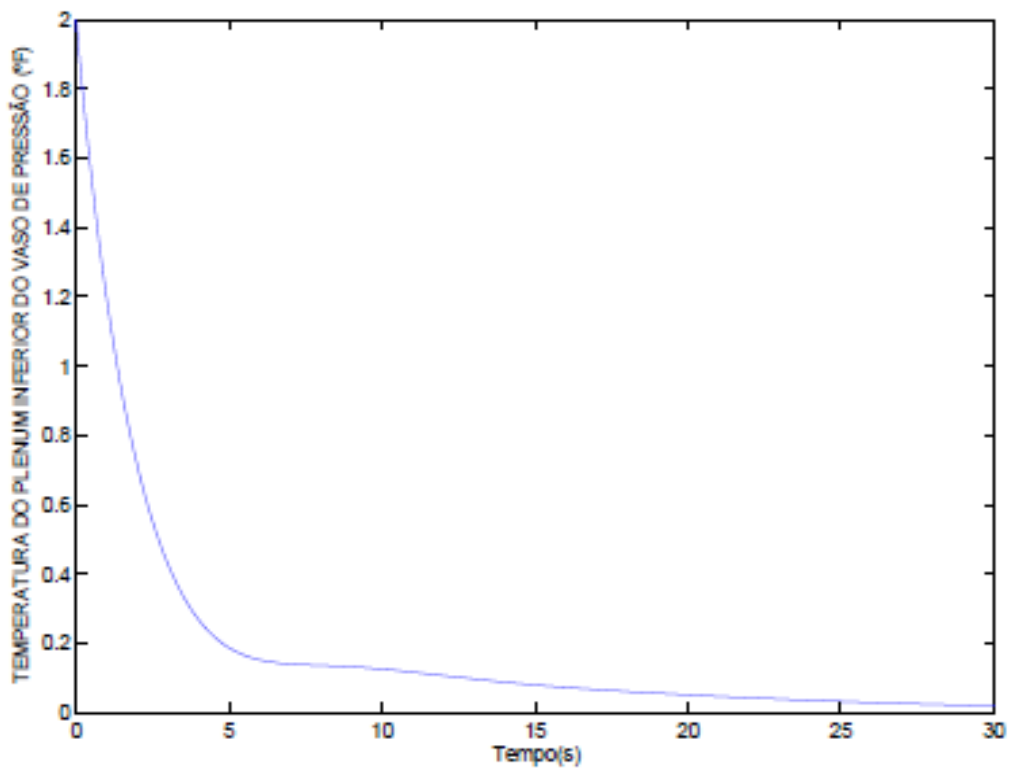


Figura 10: Resposta dinâmica da temperatura do plenum inferior. (Caso 1).



A seguir foram calculadas as respostas para o caso de retirada inadvertida de barra de controle como feito por [14], onde se utiliza controle de barras e spray do pressurizador com controlador digital do tipo LQR, estes não presentes no atual trabalho. Foi utilizado um valor de 1 pcm/segundo, até um tempo limite de 140 segundos.

Altas taxas de inserção de reatividade, por exemplo 10 pcm/segundo, causam desligamento do reator nos primeiros segundos. Já o valor de 1 pcm/segundo permite observar a evolução das variáveis de estado no transiente durante um tempo suficiente até que ocorra o desligamento por mínimo DNBR ou sobrepotência em 140 segundos.

Para tal, o sistema linear foi modificado, adicionando-se as matrizes de perturbação e de entrada da reatividade, B e u, onde a perturbação da reatividade pela retirada das barras é multiplicada por  $\frac{P_0}{\lambda}$  na equação da cinética pontual. Novamente, as variáveis são expressas em termos de suas variações.

Os resultados seguem abaixo:

#### 4.2.Caso 2 - Inserção de 1 pcm/segundo de reatividade

##### 4.2.1. Potência Nuclear

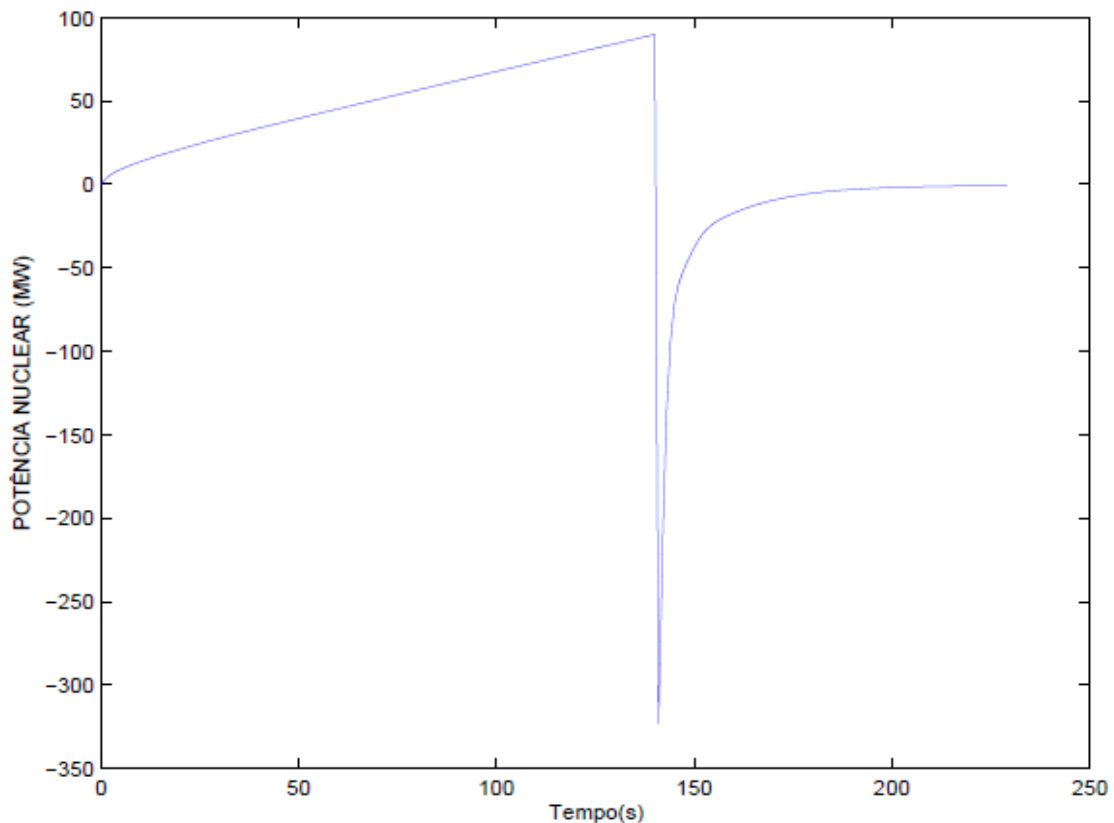


Figura 11: Resposta dinâmica da potência nuclear. (Caso 2)

#### 4.2.2. Temperatura do Combustível

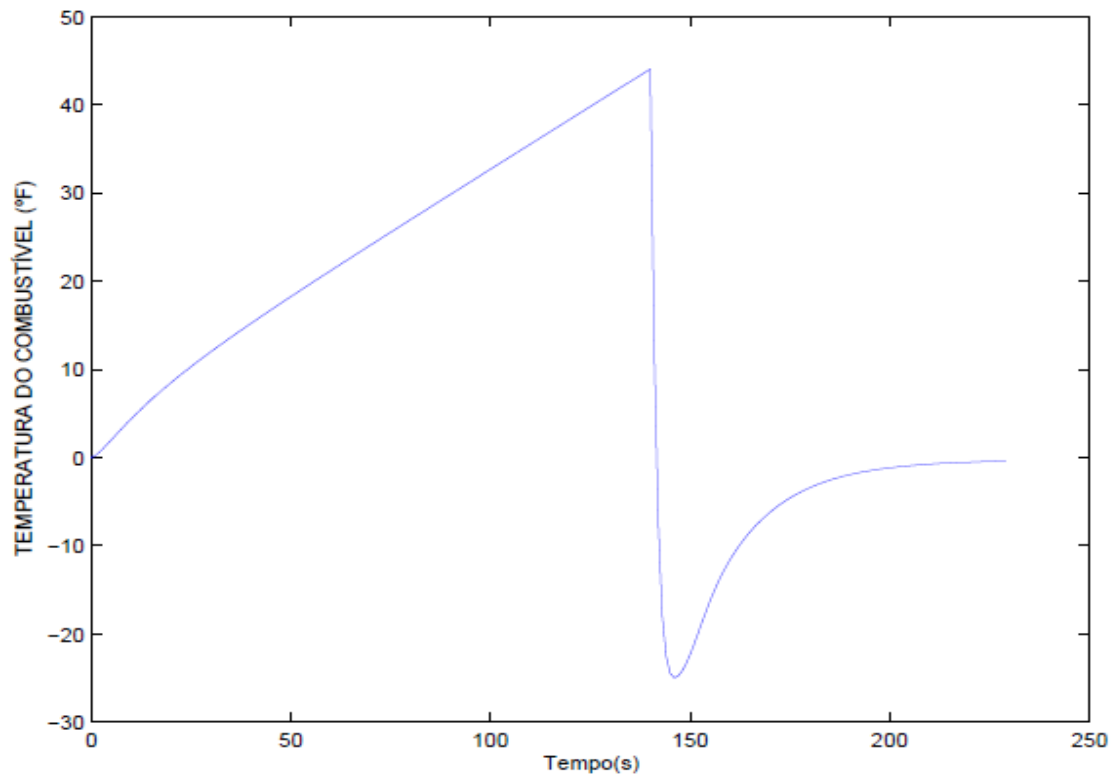


Figura 12: Resposta dinâmica da temperatura do combustível. (Caso 2)

#### 4.2.3. Pressão de Vapor

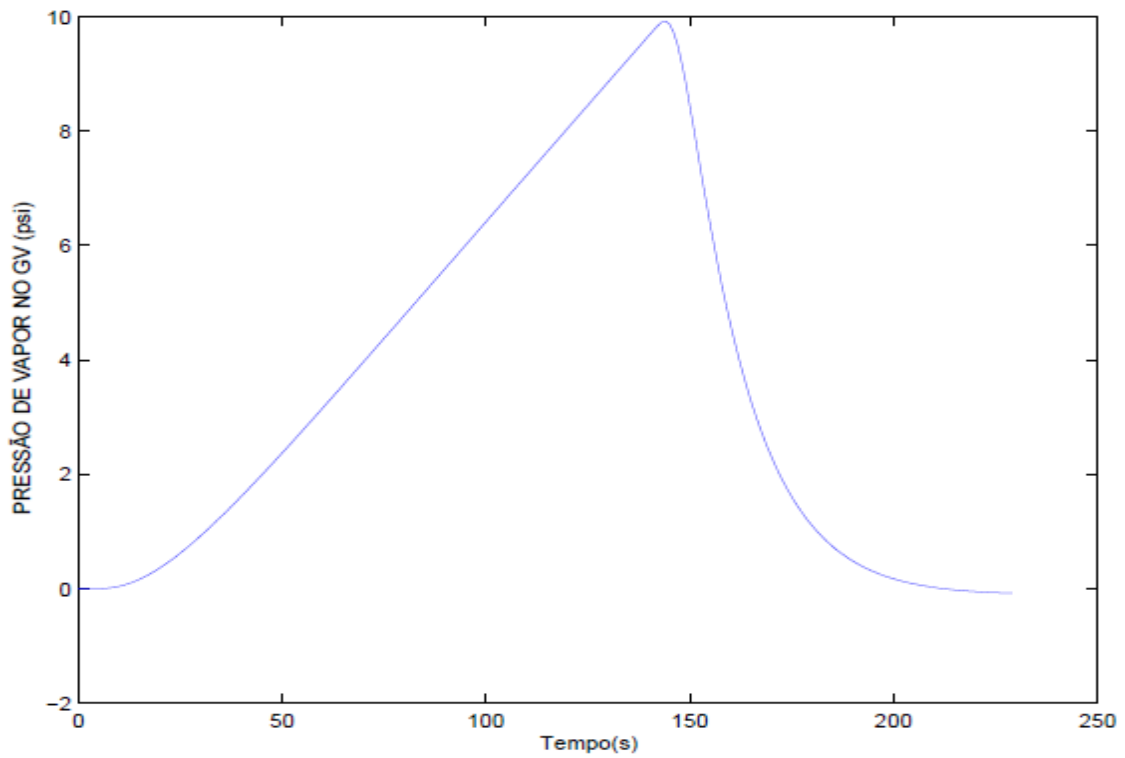


Figura 13: Resposta dinâmica da pressão de vapor. (Caso 2)

#### 4.2.4. Temperatura da Perna Fria

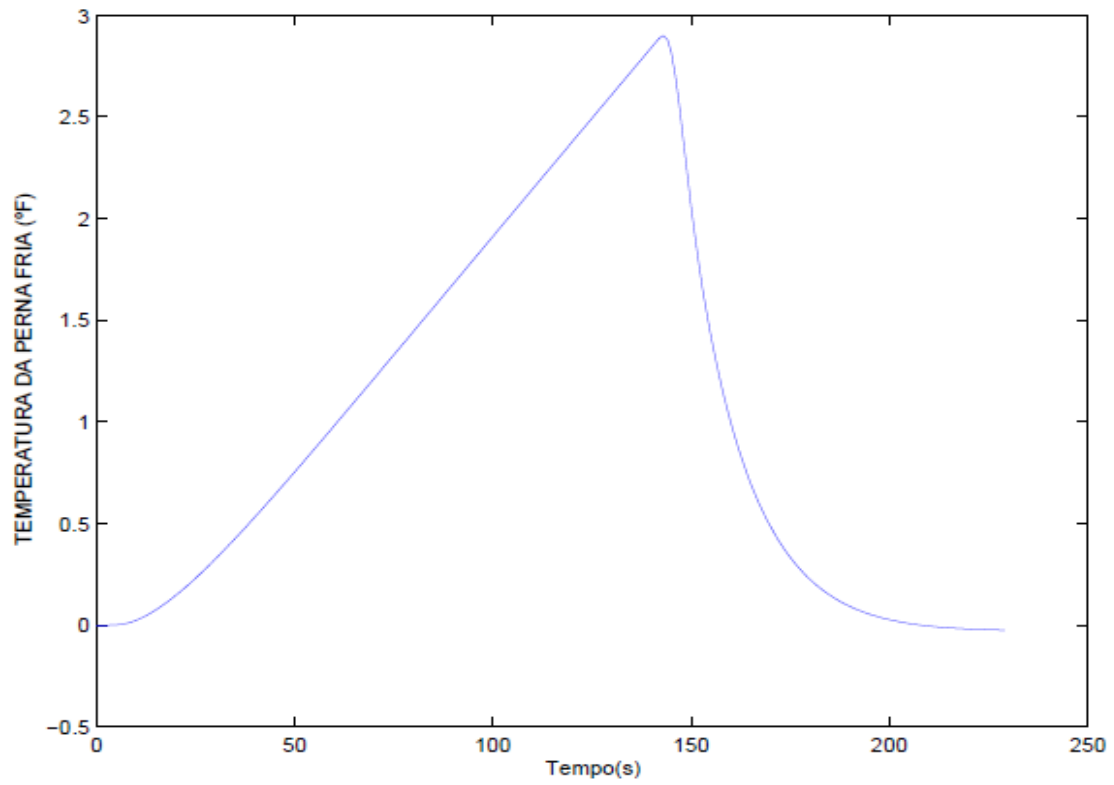


Figura 14: Resposta dinâmica da temperatura na perna fria. (Caso 2)

#### 4.2.5. Temperatura da Perna Quente

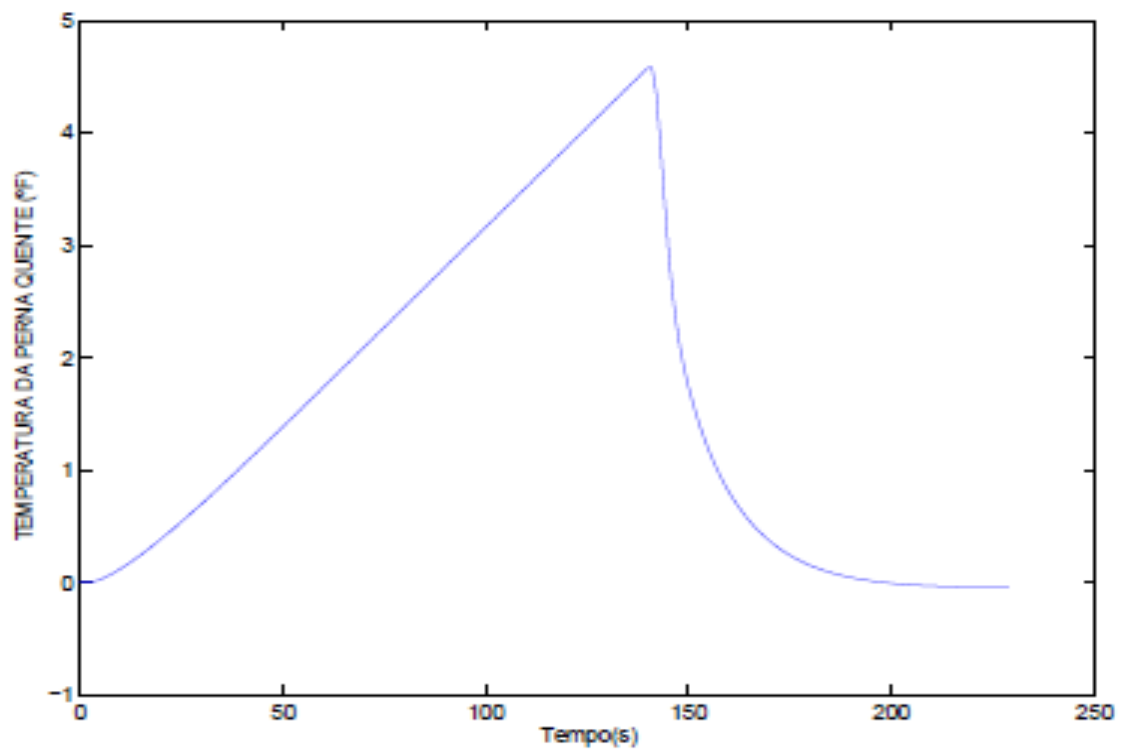


Figura 15: Resposta dinâmica da temperatura da perna quente. (Caso 2)

#### 4.2.6. Pressão do Pressurizador

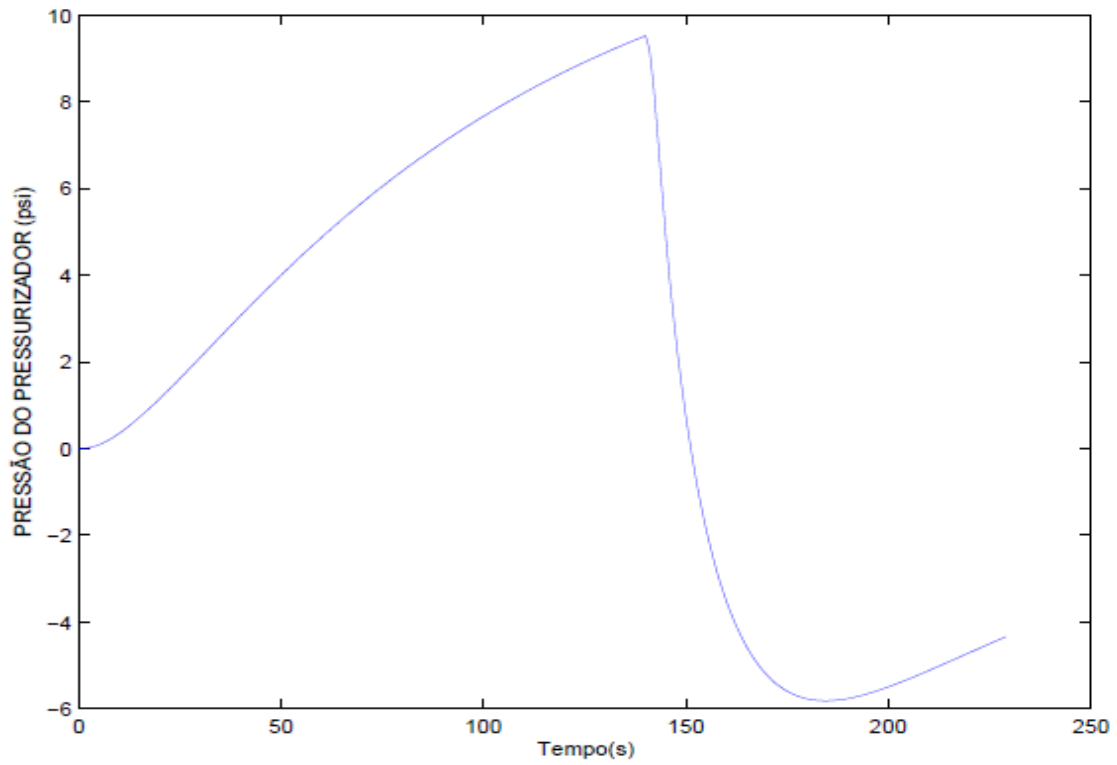


Figura 16: Resposta dinâmica da pressão do pressurizador. (Caso 2)

#### 4.2.7. Variáveis de Controle

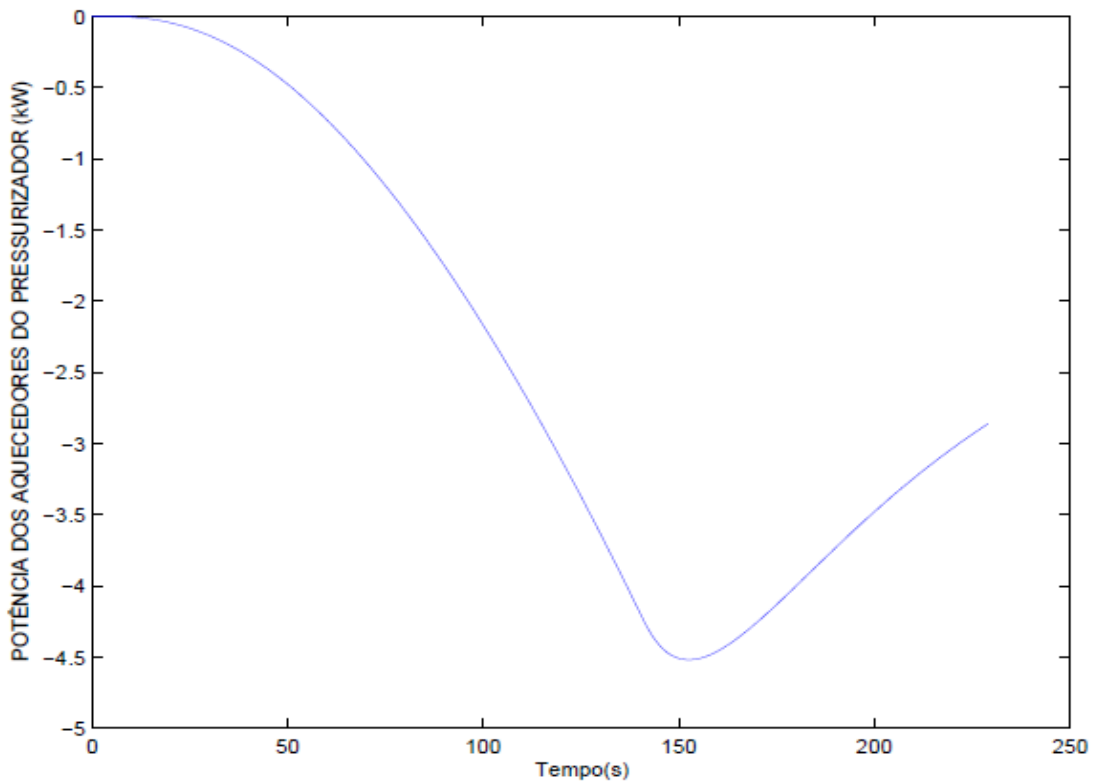


Figura 17: Resposta dinâmica da potência dos aquecedores do pressurizador. (Caso 2)

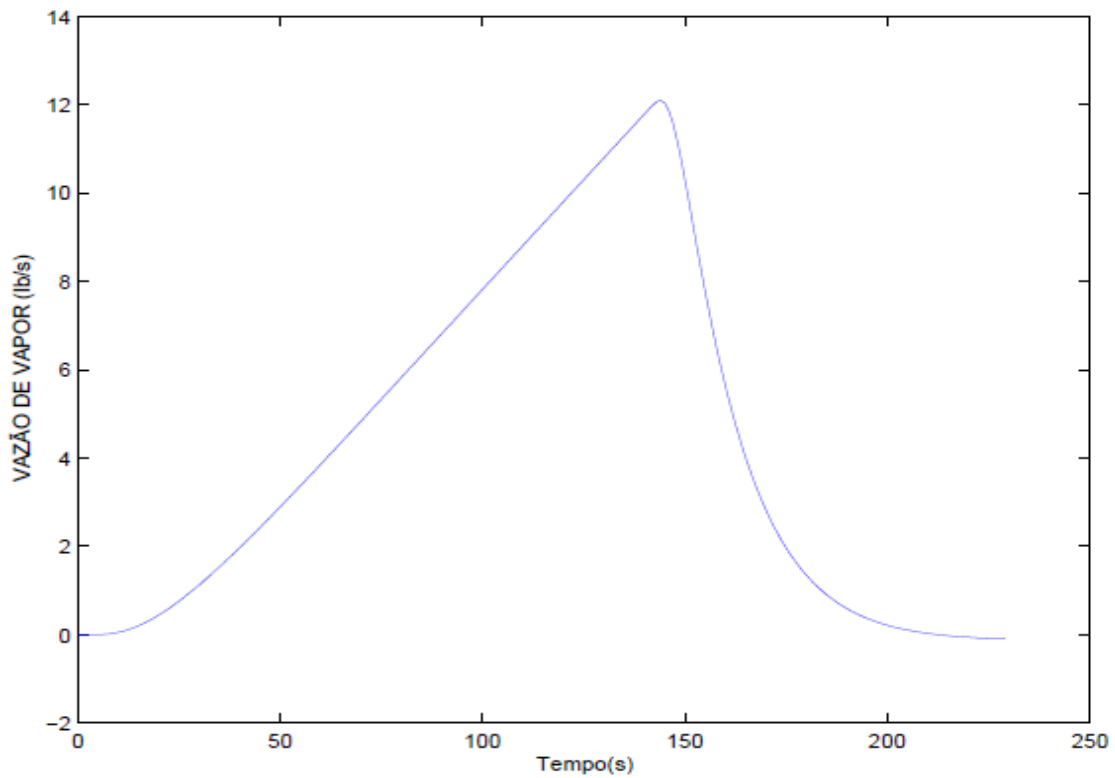


Figura 18: Resposta dinâmica da vazão de vapor. (Caso 2)

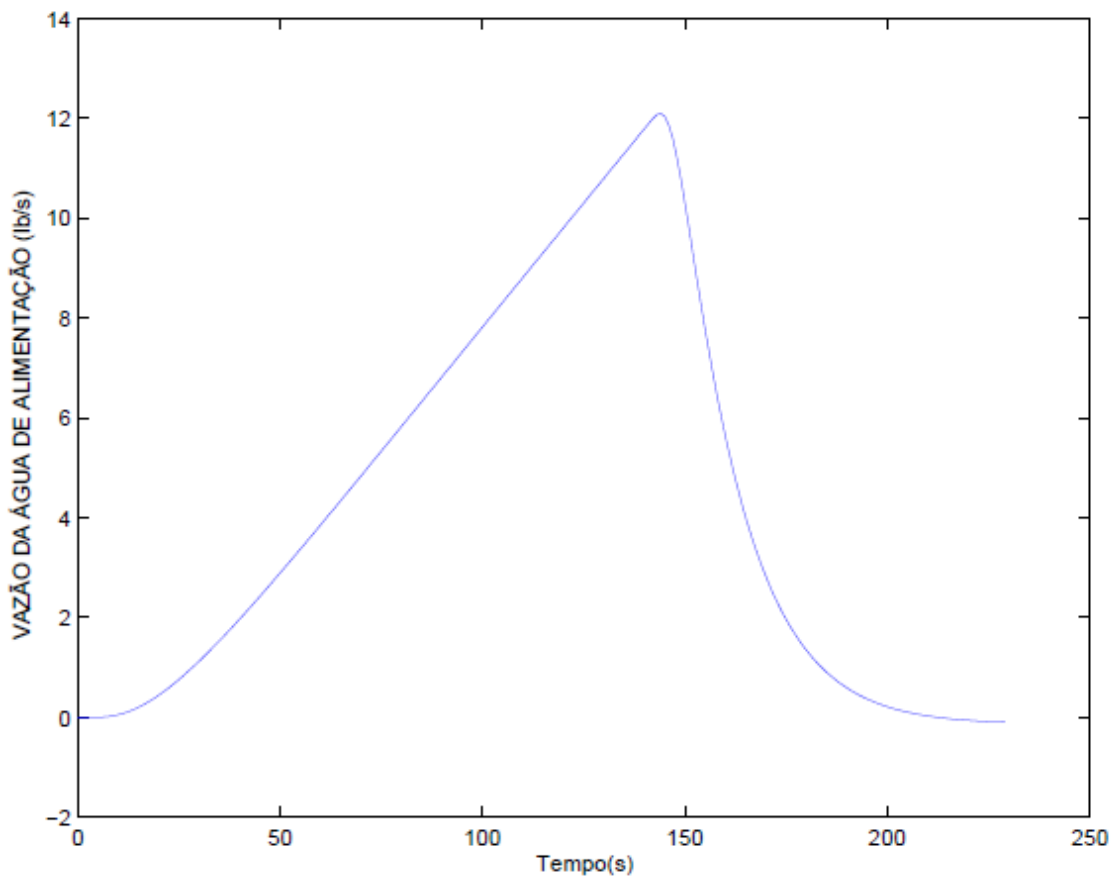


Figura 19: Resposta dinâmica da vazão da água de alimentação. (Caso 2)

### 4.3. Discussão de Resultados de HBR

Ao analisar os resultados do Caso 1 em comparação aos resultados de [6], pode-se perceber uma ligeira piora na resposta da potência, porém com estabilização bem mais rápida. Em geral, os resultados do modelo aqui desenvolvido apresentaram estabilidade bem superior, ou seja, se aproximam de zero sem apresentar um comportamento oscilatório, embora de forma mais lenta, por utilizar mais grupos de precursores e modelagem do pressurizador. O mesmo comportamento seguiu na temperatura do combustível, numa queda de temperatura um pouco maior neste modelo, porém mais estável.

A variação de temperatura no segundo nodo do refrigerante foi aproximadamente a mesma. Já a pressão no gerador de vapor teve um comportamento melhor em termos de variação, porém bem pior em termos de estabilidade, levando mais de trinta segundos para voltar aos valores iniciais.

Além de mais variáveis serem modeladas neste trabalho, o controlador digital utilizado em [6] não utiliza toda sua capacidade de controlar a planta. Ao analisar o termo  $u$  da equação (1), ele é dado pela seguinte forma:

$$u = kx \tag{52}$$

Onde  $x$  é a matriz contendo as variáveis e  $k$  o vetor que representa o controlador digital LQR, calculado em função da matriz  $A$  e do vetor  $B$  da equação (1). No caso de [6],  $B$  contém somente um termo, o coeficiente da vazão de vapor (D5) na equação (36). Portanto, a lei de controle, equação (52), é neste caso uma multiplicação escalar de dois vetores, com o termo resultante multiplicando  $B$ , este com apenas uma posição não nula. Caso mais variáveis fossem usadas as respostas dinâmicas seriam melhores.

Para o Caso 2, em comparação com os resultados obtidos em [14], o modelo deste trabalho não obteve sucesso em remover energia necessária para manter o reator numa condição segura sem seu desligamento, ou *trip*. A potência subiu em quase 100 MW, um valor muito maior do que o de comparação, no qual a potência não alcançou variação de 0.2%.

A temperatura do combustível também teve variação muito maior, chegando a quase 50 °F, enquanto que em [14] o valor máximo foi de aproximadamente 0.3 °F. Da mesma forma, a pressão de vapor, as temperaturas da perna fria e da perna quente também apresentaram maior variação. Uma diferença importante presente neste trabalho é que as

vazões crescem ao invés de caírem, como em [14]. Isso se dá pelo fato de que as vazões de água de alimentação e de vapor serem as únicas formas de remover a energia crescente no reator.

É importante notar que o modelo usado é bem mais completo que o presente neste trabalho, usando um controlador digital LQR controlando velocidade das barras de controle, vazão do aspergidor do pressurizador, potência dos aquecedores do pressurizador, fluxo de vapor do gerador de vapor e fluxo de água de alimentação. Além disso, os dados usados são de Angra 1.

Também em [14], há resultados usando os mesmos dados porém com apenas os aspergidores do pressurizador como controladores. Neste caso, as respostas dinâmicas deste trabalho são mais estáveis e variam menos, pelo fato de contarem com controle das vazões de água de alimentação e vapor dos geradores de vapor.

## 5. ANÁLISE DE ANGRA 1

Para os cálculos de Angra 1, foram utilizados dados do seu *Final Safety Analysis Report* [15], que estão listados no Apêndice II. Os valores de volumes das tubulações foram extraídos de [18], de forma aproximada pois não havia todas as dimensões necessárias. É importante salientar que nem todos os dados disponíveis para os casos de HBR foram encontrados para Angra 1. Portanto, no lugar desses foram usados dados de HBR, devido à similaridade entre os dois reatores, como por exemplo, serem reatores a água pressurizada de mesmo projetista.

Para efeito de comparação, os mesmos casos anteriores foram simulados para Angra 1, a saber, acréscimo de 2 °F na temperatura do plenum inferior do reator e uma inserção de reatividade de 1 pcm/segundo. Os resultados são:

### 5.1. Caso 3 - Acréscimo de 2°F na temperatura do plenum inferior

#### 5.1.1. Potência Nuclear

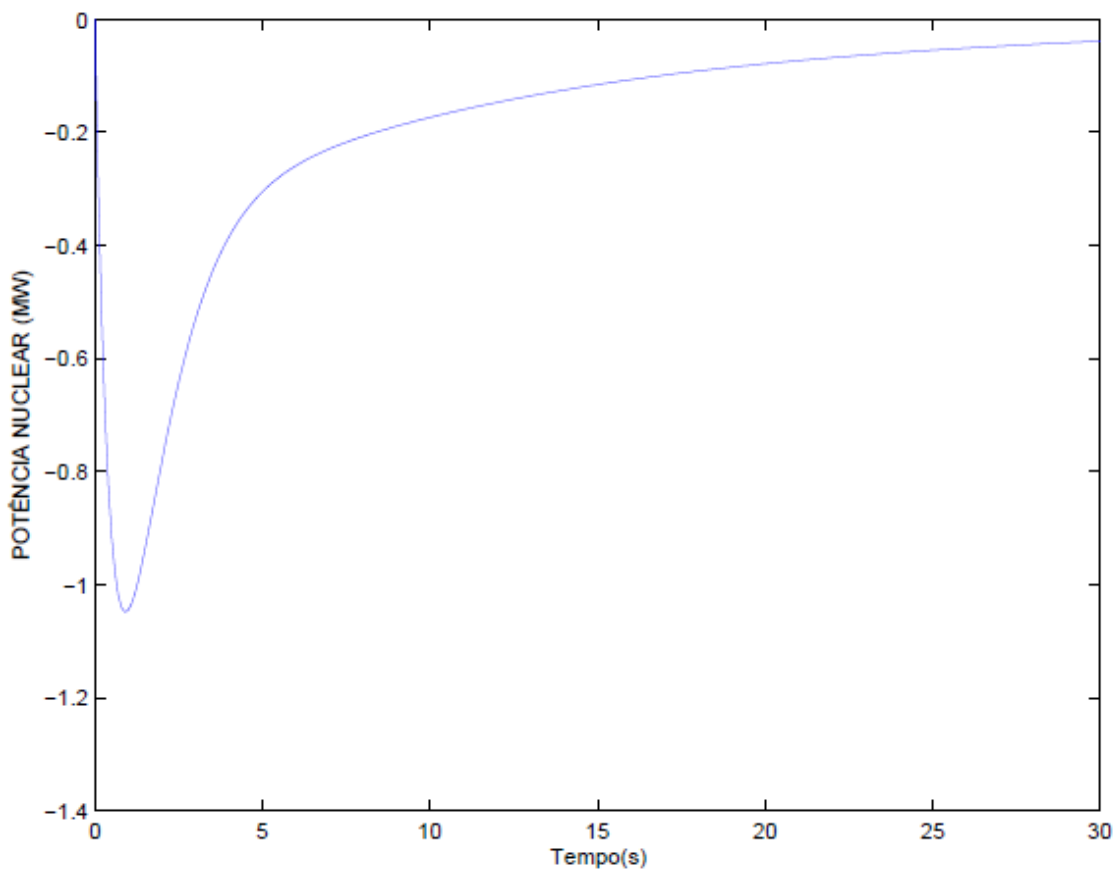


Figura 20: Resposta dinâmica da potência nuclear. (Caso 3)



### 5.1.2. Temperatura do combustível

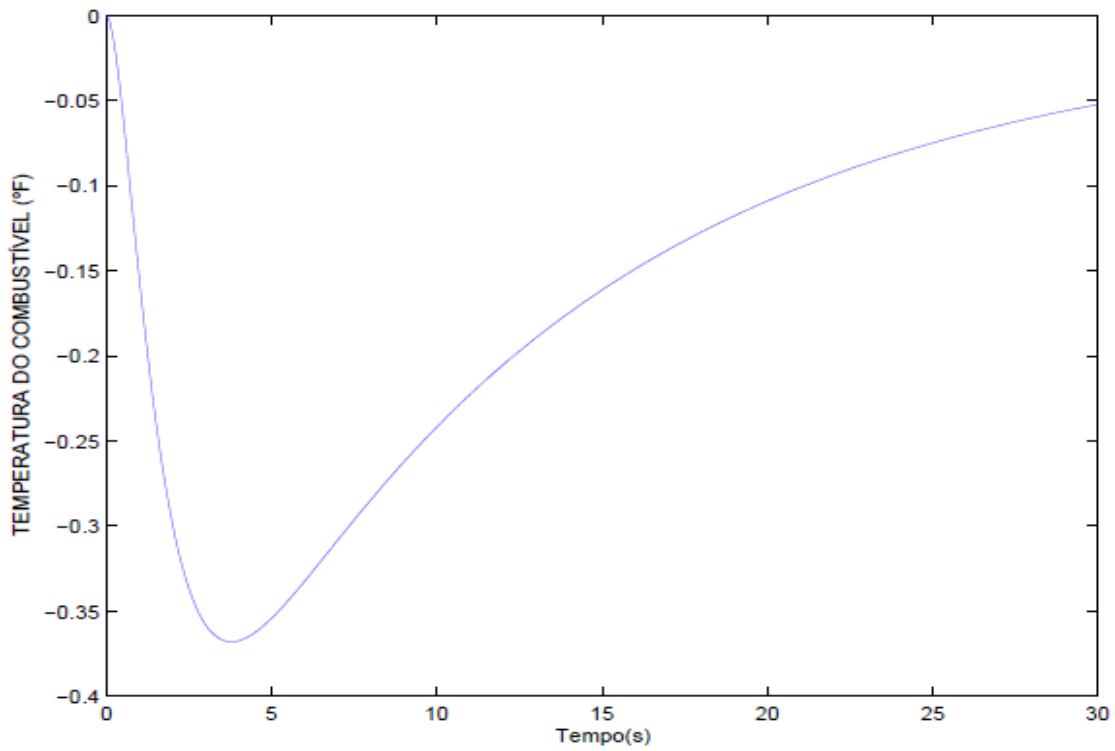


Figura 21: Resposta dinâmica da temperatura do combustível (Caso 3).

### 5.1.3. Temperatura do refrigerante do nodo 2

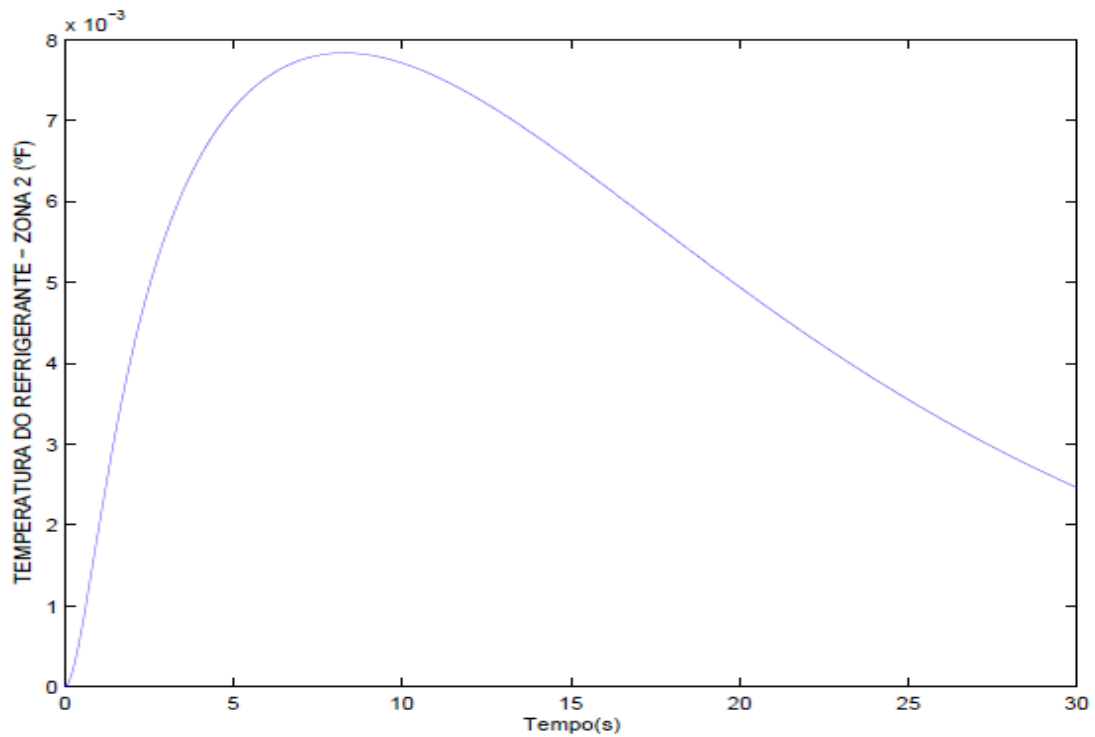


Figura 22: Resposta dinâmica do segundo nodo de temperatura do refrigerante(Caso 3)

#### 5.1.4. Pressão de Vapor

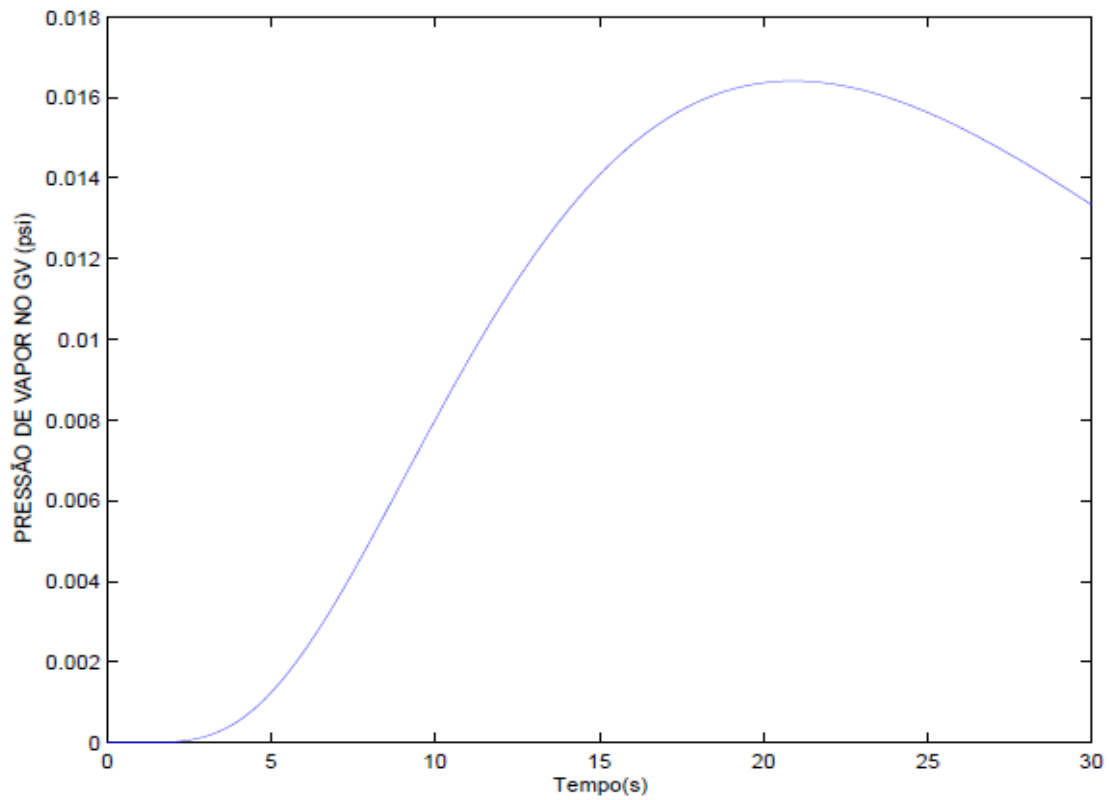


Figura 23: Resposta dinâmica da pressão de vapor (Caso 3)

#### 5.1.5. Temperatura do plenum inferior

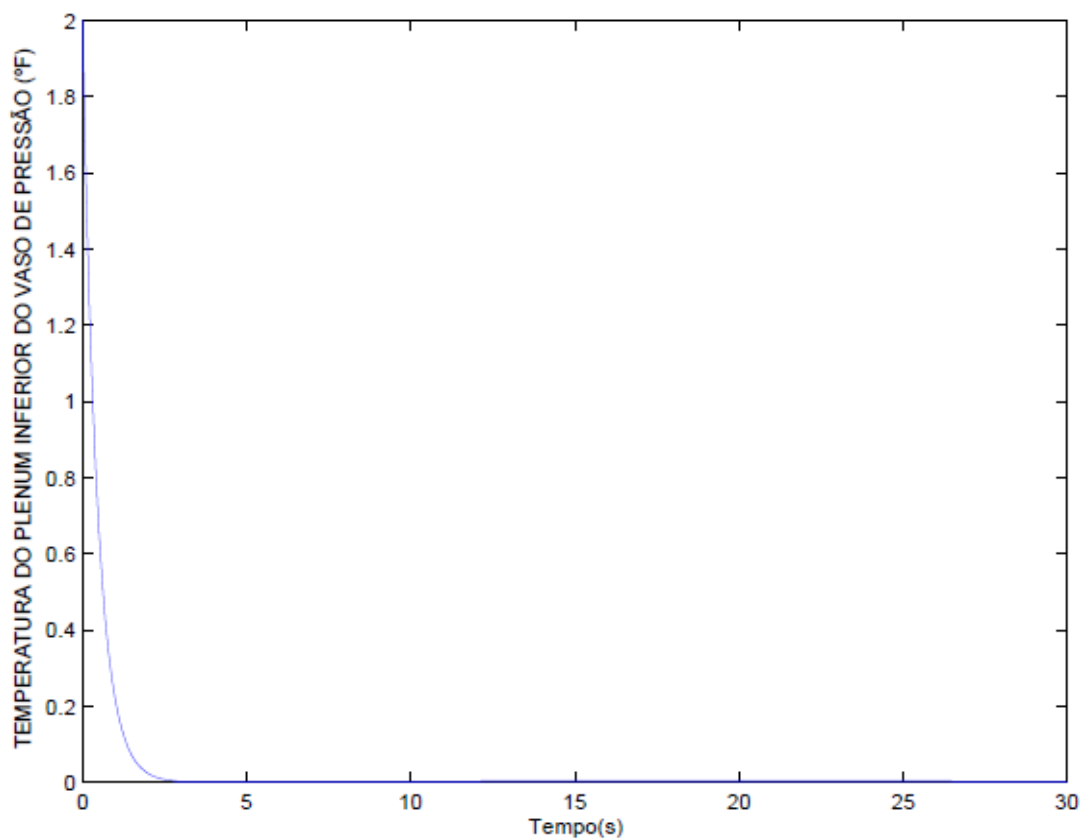


Figura 24: Resposta dinâmica da temperatura no plenum inferior (Caso 3)

## 5.2. Caso 4 - Inserção de 1 pcm/segundo de reatividade

### 5.2.1. Potência Nuclear

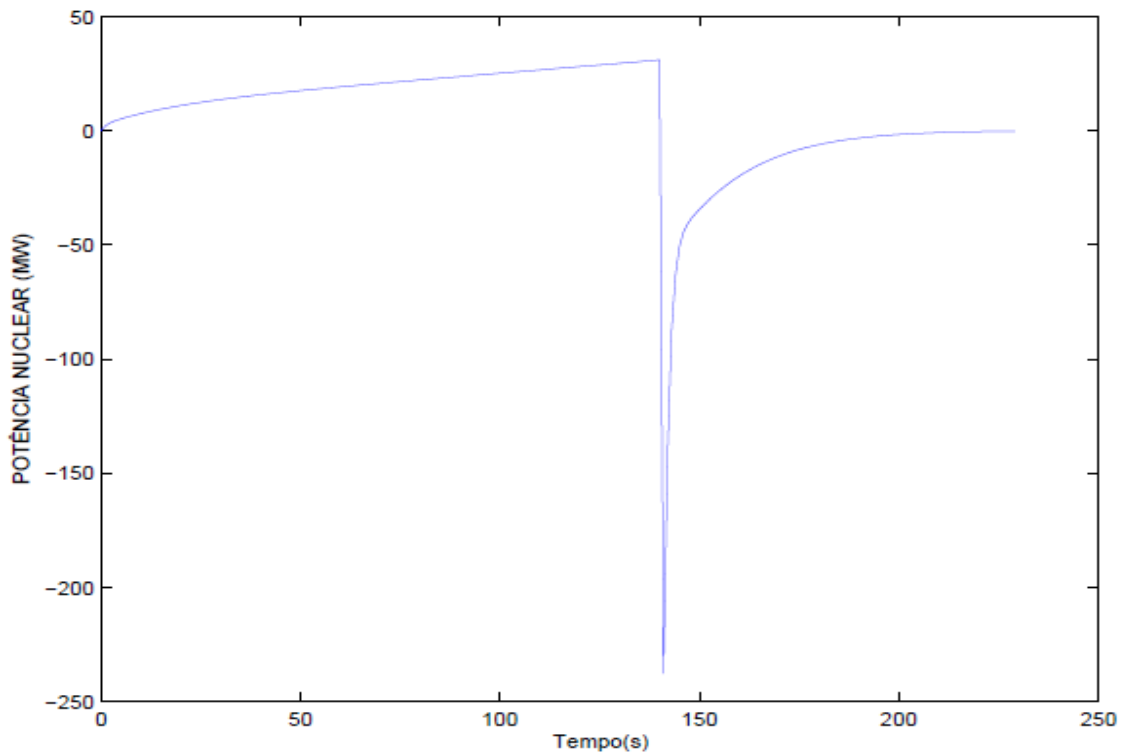


Figura 25: Resposta dinâmica da potência nuclear. (Caso 4)

### 5.2.2. Temperatura do combustível

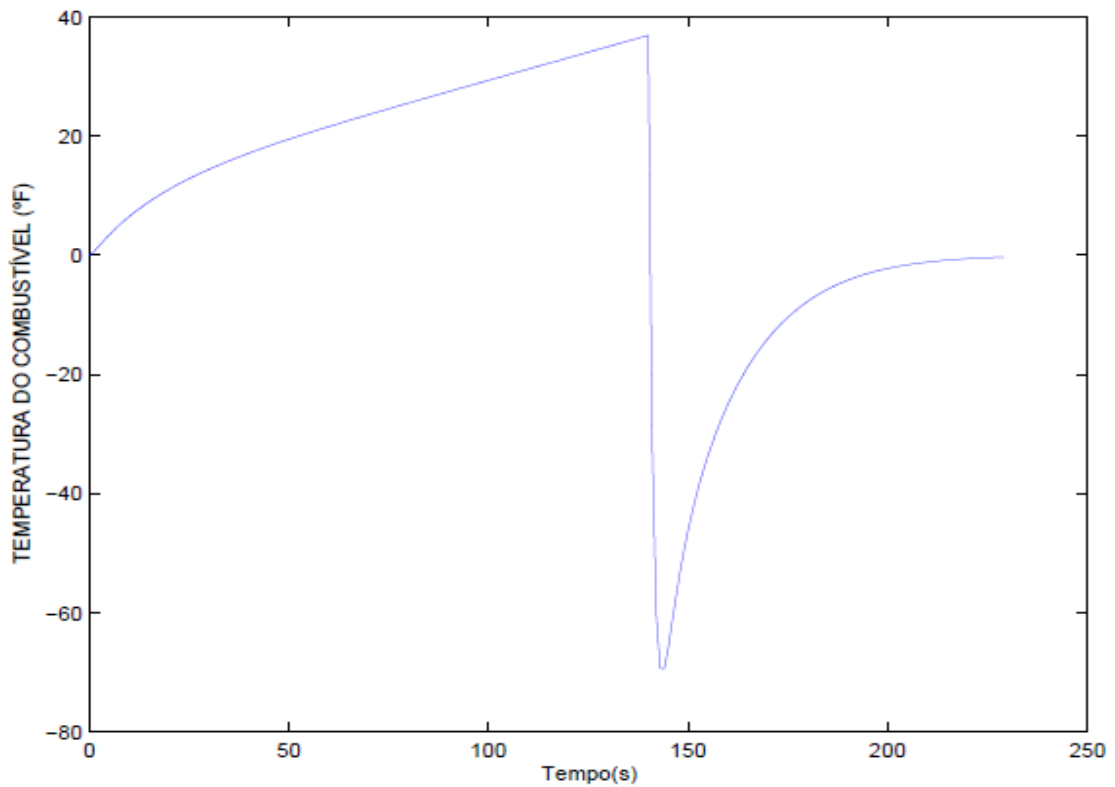


Figura 26: Resposta dinâmica da temperatura do combustível. (Caso 4)

### 5.2.3. Pressão de Vapor

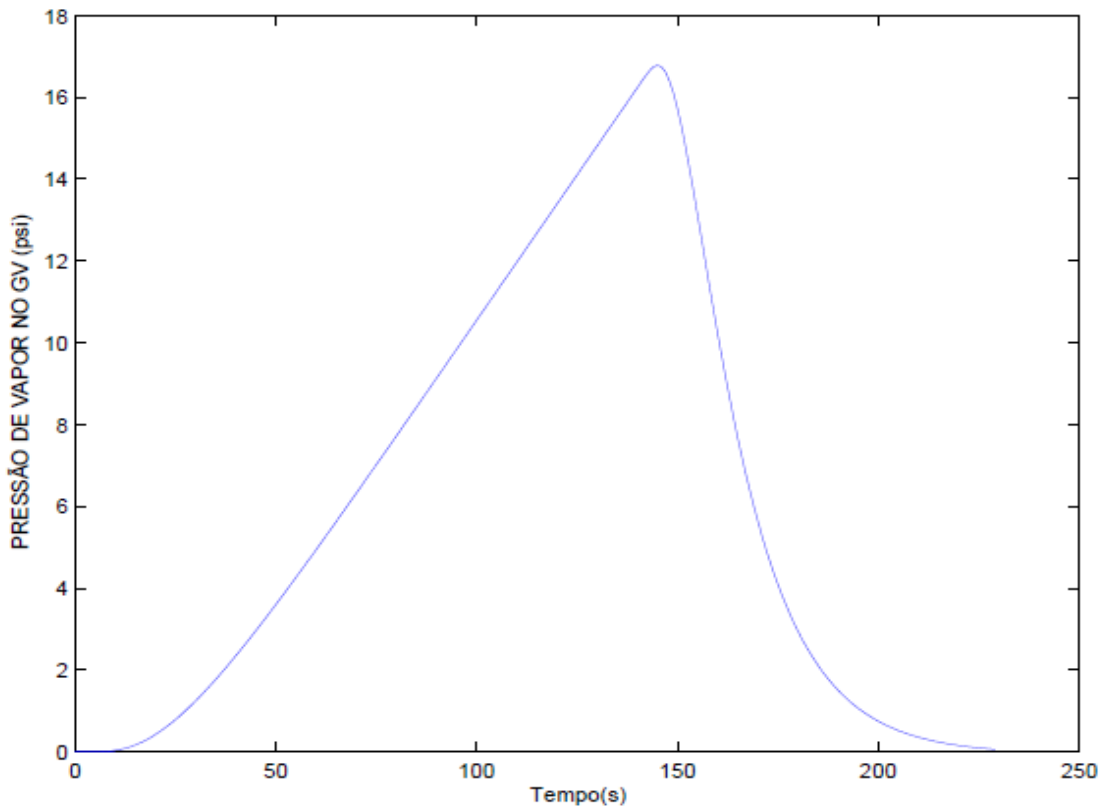


Figura 27: Resposta dinâmica da pressão de vapor. (Caso 4)

### 5.2.4. Temperatura da Perna Fria

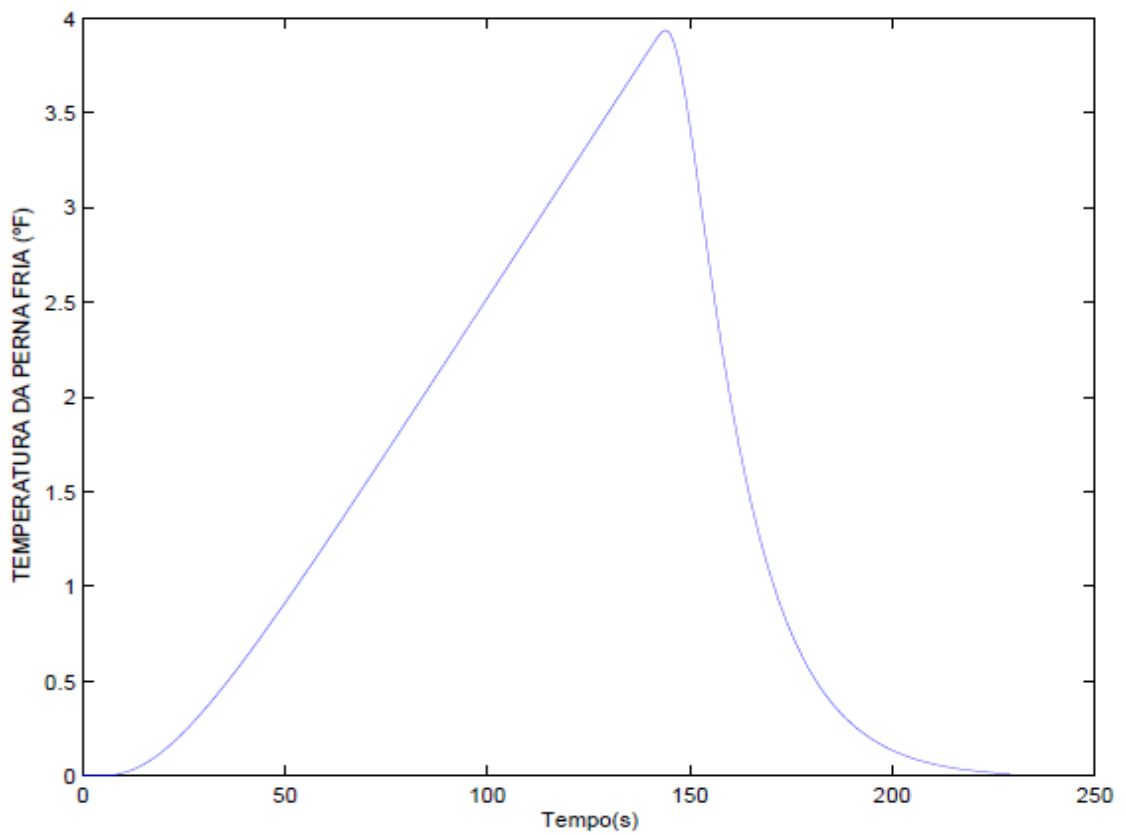


Figura 28: Resposta dinâmica da temperatura na perna fria. (Caso 4)

### 5.2.5. Temperatura da perna quente

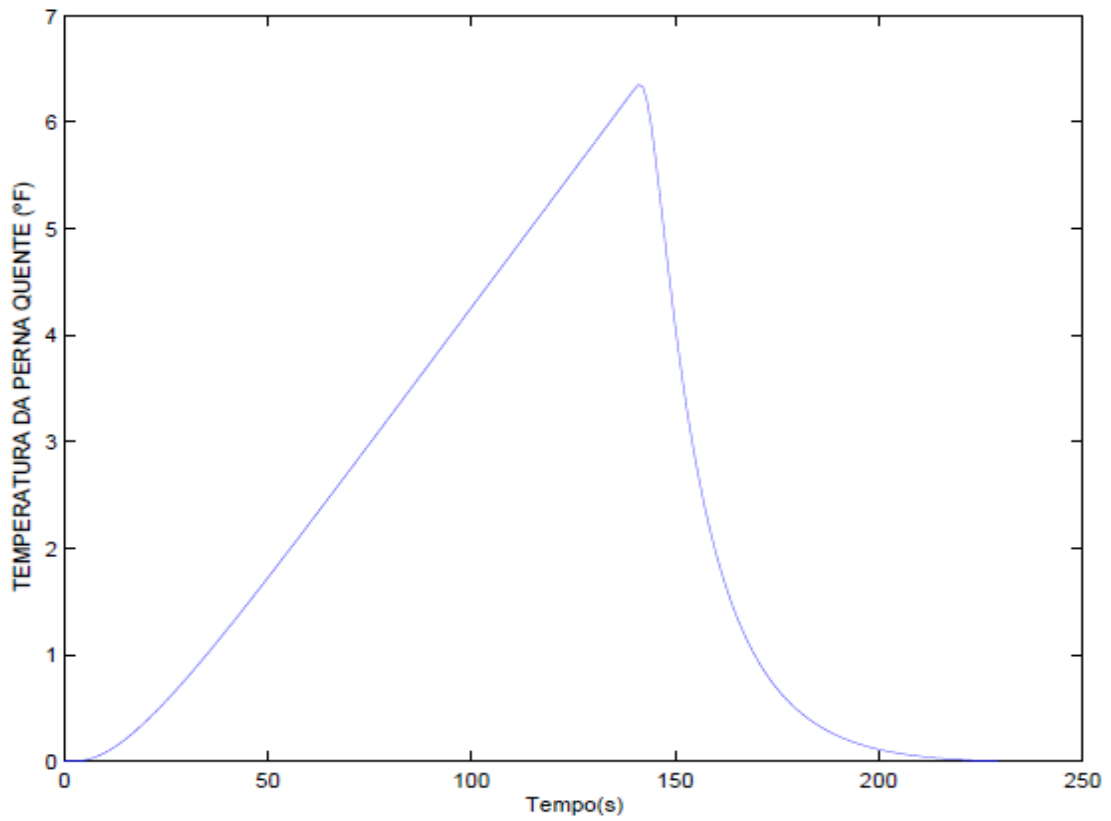


Figura 29: Resposta dinâmica da temperatura da perna quente. (Caso 4)

### 5.2.6. Pressão do Pressurizador

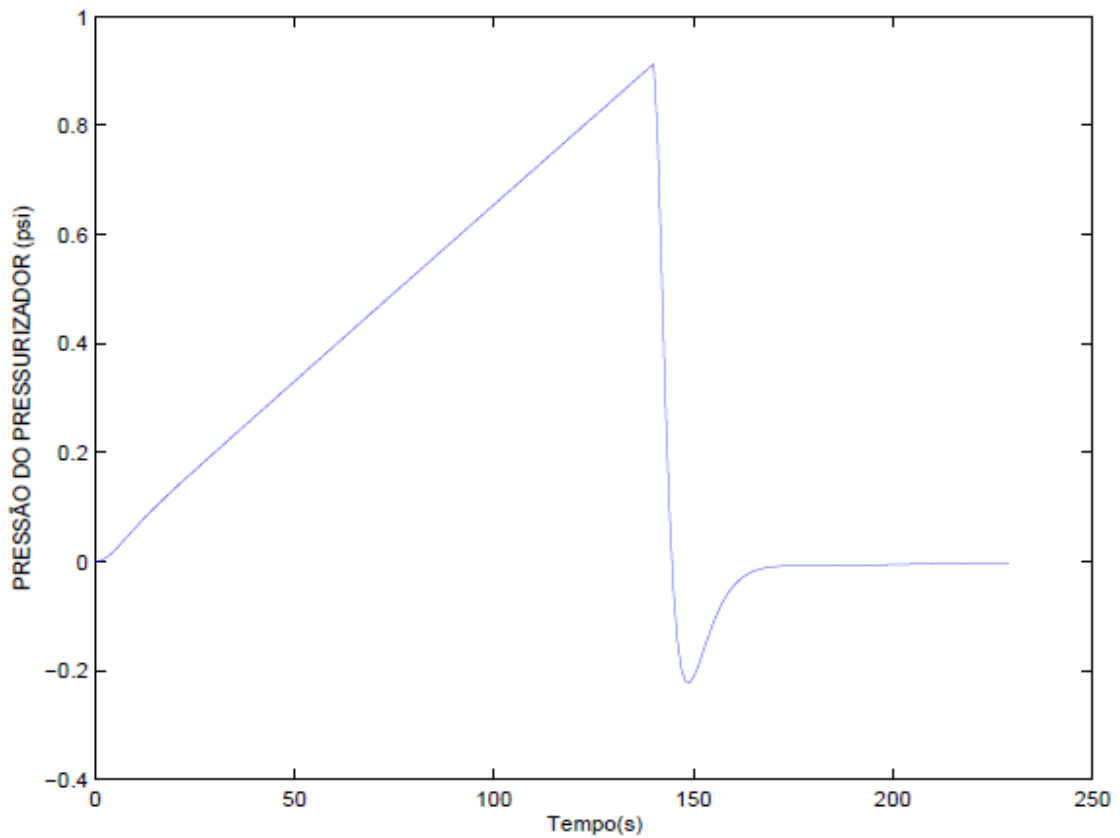


Figura 30: Resposta dinâmica da pressão do pressurizador. (Caso 4)

### 5.2.7. Variáveis de Controle

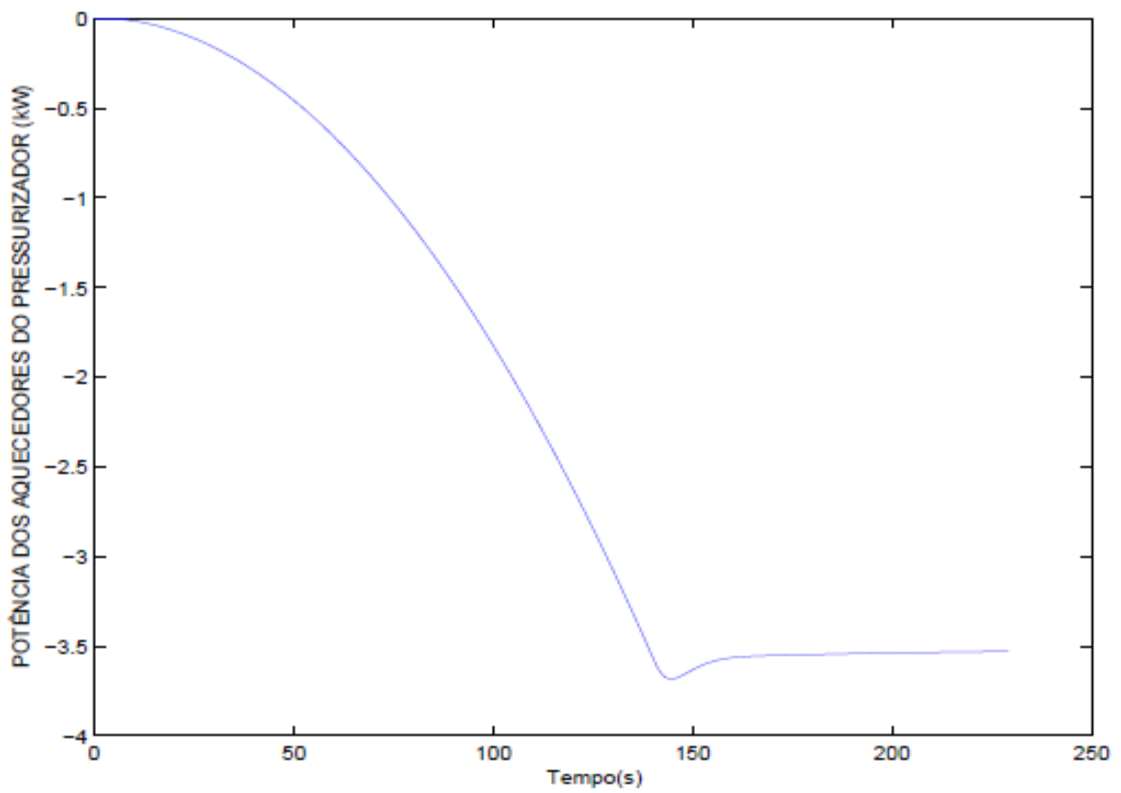


Figura 31: Resposta dinâmica da potência dos aquecedores do pressurizador. (Caso 4)

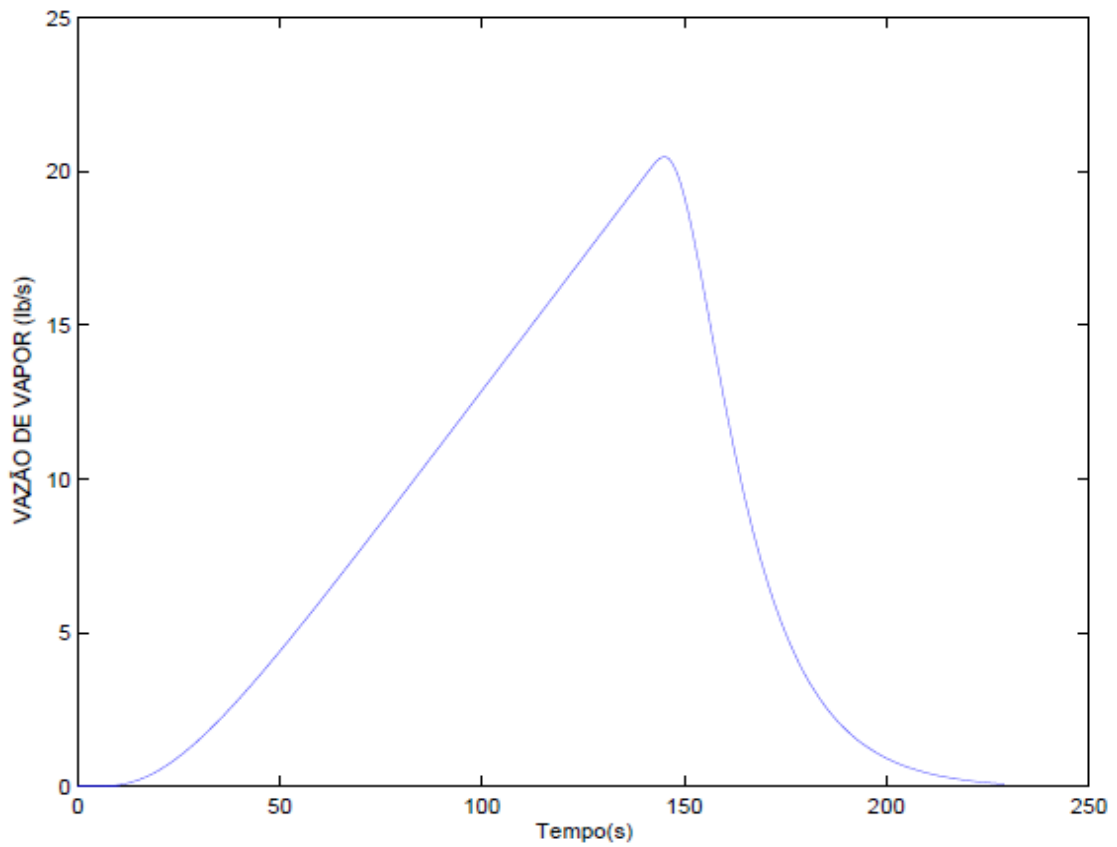


Figura 32: Resposta dinâmica da vazão de vapor. (Caso 4)

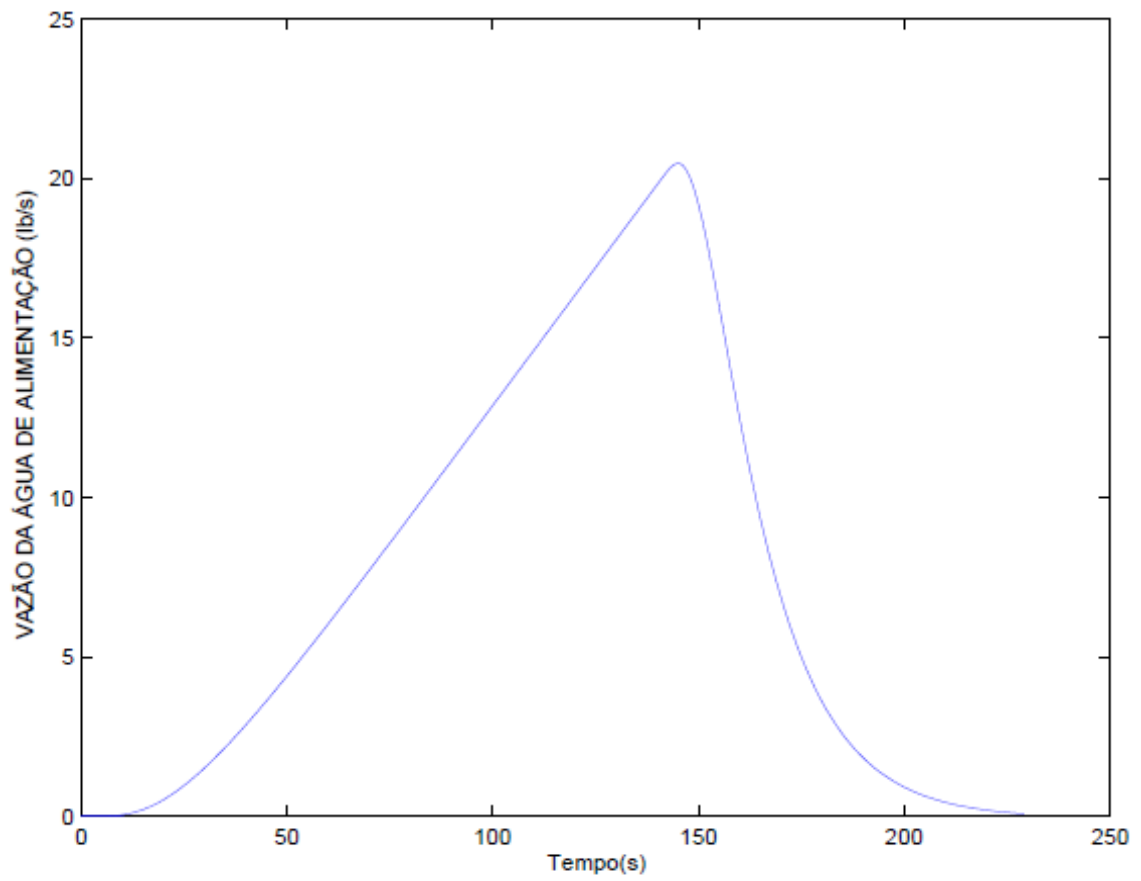


Figura 33: Resposta dinâmica da vazão da água de alimentação. (Caso 4)

### 5.3. Discussão dos Resultados de Angra 1

Para o Caso 3, houve significativa melhora nas respostas dinâmicas obtidas em relação ao Caso 1. Isso se deve às características de Angra 1, como por exemplo, volumes das tubulações menores que em HBR por terem menor comprimento apesar de serem do mesmo diâmetro, o que influencia em tempos de residência nas tubulações menores. Isso facilita o transporte de energia mais rapidamente do primário para o secundário.

Além disso, Angra 1 possui área de transferência de calor nos geradores de vapor muito maiores que em HBR, corroborando para remoção de energia mais eficiente junto com a rapidez dada pelo tamanho reduzido do primário. Como o modelo se baseia na remoção de calor pelo gerador de vapor, essas condições de Angra 1 favorecem que o controle seja feito de forma eficiente para transientes menos desafiadores para a planta.

Para o Caso 4, mesmo com o comportamento com menos variação, o modelo não foi capaz de remover energia de forma suficiente a impedir o desligamento do reator, com as variáveis alcançando valores muito maiores que em [14]. Ainda assim, as respostas do Caso 4 foram melhores que no Caso 2. Um fator que contribuiu para isso foram as vazões de vapor e de água de alimentação maiores no Caso 4, o que fez com que mais energia fosse retirada do sistema primário.



## 6. CONCLUSÃO

Em comparação com o modelo utilizado em [6], é visível a melhora no comportamento dinâmico, ou seja, as respostas retornaram à estabilidade mais rapidamente e produziram menos picos e vales. Isso era esperado devido ao uso de seis grupos de precursores e à adição do controle das vazões de vapor e de água de alimentação, além da modelagem utilizar o pressurizador. Logo, o modelo utilizado neste trabalho, sendo mais sofisticado, resulta numa maior qualidade de controle.

Pode-se perceber também maiores desvios na potência e na temperatura do combustível em virtude de as barras de controle e aspergidores do pressurizador não terem sido modelados, que poderiam ter tido um comportamento ainda mais estável.

Na comparação dos resultados quando há retirada das barras de controle, percebe-se que o modelo se comporta pior que o de [14] em termos de estabilidade e variação. Há também diferenças nas variáveis de controle do secundário (vazões do gerador de vapor), que aumentam com a inserção de reatividade ao invés de diminuir, como em [14]. As diferenças aqui são devido às instalações sendo modeladas (HBR de 3 *loops* e Angra 1 de 2 *loops*). Além disso, o fato de que em [14] existe o controle de aspergidores pelo pressurizador que limita a pressão do primário.

O controlador digital usado em [14] também permite que todas as variáveis de controle (spray, reatividade, aquecedores, água de alimentação e vazão de vapor) sejam controladas simultaneamente. Neste trabalho não há o controle de aspergidor, apenas aquecedores. Não há também controle de reatividade por barras de controle, de modo que a remoção e limitação da energia do primário só pode ser executada pelo controle de vazão da água de alimentação e vapor no gerador de vapor, o que ocasiona uma demanda maior dessas variáveis, tendendo a subir.

Para o caso de Angra 1, existe uma grande melhora no desempenho em relação à HBR (menor potência em Angra 1), quando comparando os casos 1 e 3 deste trabalho. Para os casos de inserção de reatividade (casos 2 e 4), além da melhora da potência, outros parâmetros como as temperaturas do secundário em geral, apresentam melhores respostas em Angra 1 do que em HBR. Isso pode ter se dado pelos menores tempos de residências nas tubulações em geral, além da maior área de transferência de calor nos geradores de vapor.

Para obter melhores resultados poderia se ampliar o modelo com a utilização de mais nodos e adicionar o sistema secundário da instalação, como feito em [11] e [16]. Isso possibilita um aumento no número de acidentes e transientes que podem ser simulados, porém seria necessário adicionar mais variáveis de controle, entre elas os *sprays* do pressurizador e as barras de controle para suportar cenários mais desafiadores como a retirada descontrolada de barras.

Novamente, é preciso lembrar que alguns dados usados na modelagem de Angra 1 são na verdade de HBR, o que deve demonstrar cautela na interpretação dos resultados, apesar de ser uma comparação válida levando esses fatores em comparação nestes dois casos analisados. Para os casos de pequenas perturbações, como em [6], controles do geradores de vapor como os utilizados neste trabalho podem ser efetivos. É também preciso verificar se controladores PID para desbalanço das vazões de vapor e água de alimentação e também do nível de água dos geradores de vapor resultariam em melhor desempenho.

# Referências

- [1] Upadhyaya, B. R., *Chapter 10 – Part1 Nuclear Reactor Systems and Nuclear Dynamics Modeling, The University of Tennessee*, 2014.
- [2] Narbel, Patrick, Hansen, Jan Petter, Lien, Jan R. *Energy Technologies and Economics*, Springer, 2014.
- [3] Comissão Nacional de Energia Nuclear, Licenciamento de Instalações Nucleares, CNEN-1.04, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- [4] NUREG -0800, *Standard Review Plan for Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition*, United States Nuclear Regulatory Commission, 2014.
- [5] P.F. Wang, Y. Liu, B.T. Jiang, J.S. Wan, F.Y. Zhao, *Proceedings of the Annals of Nuclear Energy* 62, 2013, p. 208-223, *Nodal dynamics modeling of AP1000 for control system design and simulation*.
- [6] Nair, P. R., Gopal, M., *Proceedings of the IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. NS-34, No. 6, December 1987, p. 1834-1842, *Sensitivity Reduce Design for A Nuclear Pressurized Water Reactor*.
- [7] T. W. Kerlin, E. M. Katz, J. G. Thakkar, J. E. Strange. *Theoretical and Experimental Dynamic Analysis of the H. B. Robinson Nuclear Plant*. Nuclear Technology, 1976.
- [8] Westinghouse Electric Company, *The Westinghouse Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant*, 1984.
- [9] H. B. Robinson Nuclear Power Plant. <http://sharepoint.bhienergy.com/outageinfo/hbrobinson/default.aspx>. Acessado em 15 de outubro de 2015.
- [10] Jong Joo Sohn, Poong Hyun Seong. *A steam generator model identification and robust HI controller design with m-gap metric for a feedwater control system*. Department of Nuclear and Quantum Engineering, Korea Advanced Science and Technology Institute, 335 Gwahangno Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Republic of Korea, 2010.
- [11] M. Naghedolfeizi. *Dynamic Modeling of a Pressurized Water Reactor Plant for Diagnostics and Control*, Master's Thesis, University of Tennessee, 1990.
- [12] Guimarães, L., Flores, P. T. *Modelos Dinâmicos Simplificados de Gerador de Vapor como Ferramenta de Ensino*, Revista Brasileira de Ensino de Física vol. 20, no. 3, Setembro, 1998.

[13] Descrição da função lsim. <http://www.mathworks.com/help/control/ref/lsim.html>. Acessado em 13 de outubro de 2015.

[14] M. A. B. Alvarenga, J. A. C. C. Medeiros, J. J. Rivero, P. F. Frutuoso e Melo. *Simulation of Inadvertent Rod Cluster Control Assembly Bank Withdrawal at Power for Angra 1 NPP Using an LQR Digital Controller. Proceedings of the 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH-16, American Nuclear Society, La Grange Park, IL, 2015, pp. 4771-4783.*

[15] Angra 1 *Final Analysis Report (FSAR)*, Unit 1, Rev. 36, 2005.

[16] J. D. Freels, "*Modeling for Long-Term Power System Dynamic Simulation*", M.S. Thesis, Nuclear Engineering Department, The University of Tennessee, Knoxville, TN, 1978.

[17] J. G. Thakkar, "*Correlation of Theory and Experiment for the Dynamics of a Pressurized Water Reactor*", Nuclear Engineering Department, M.S. Thesis, The University of Tennessee, Knoxville, TN, March, 1975.

[18] *Angra 1 Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant*, Central Elétrica de Furnas, *Volume V-Balance of Plant, Preliminary Engineering Information*, January, 1971.

## APÊNDICE I

### 1) Características de H. B. Robinson

Dados da Planta		
Tipo de Reator		PWR
Número de Geradores de Vapor		3
Número de Pressurizadores		1
Eficiência		33.60%
Parâmetros Térmicos e Hidráulicos do Núcleo		
Potência Térmica (MWth)		2200
Pressão Nominal do Sistema Primário (psi)		2250
Taxa de Fluxo de Refrigerante Total (lb/h)		1.02E+08
Velocidade Média do Refrigerante (ft/s)		14.3
Massa Total de Refrigerante no Primário (lb)		406050
Temperatura Nominal de Entrada do Refrigerante (°F)		546.2
Temperatura Nominal de Saída do Refrigerante (°F)		602.1
Área Superficial de Transferência de Calor Ativa ( $ft^2$ )		42460
Fluxo de Calor Médio ( $Btu/(hft^2)$ )		171600
Coefficiente de Transferência de Calor do Combustível para o Refrigerante ( $Btu/(hft^2°F)$ )		176
Parâmetros Cinéticos		
Coefficiente Doppler ( $\Delta k/k$ )/ °F		-1.30E-05
Coefficiente de Temperatura do Moderador ( $\Delta k/k$ )/ °F		-2.00E-04
Coefficiente de Pressão do Moderador ( $\Delta k/k$ )/psi		3.00E-06
Tempo de Vida dos Nêutrons Prontos (s)		1.60E-05
Fração de Nêutrons Retardados		0.0064
Constantes dos Nêutrons Retardados		
Vida Média (s)	Constante de Decaimento ( $\lambda_i, s^{-1}$ )	Fração
80.4	0.0124	0.00021
32.8	0.0305	0.0014
8.98	0.111	0.00125
3.32	0.301	0.00253
0.88	1.14	0.00074
0.332	3.01	0.00027

Características do Gerador de Vapor	
Gerador de Vapor	
Número de Tubos-U	3260
Diâmetros dos Tubos-U (in.)	0.875
Espessura Média das Paredes dos Tubos (in.)	0.05
Massa de Metal dos Tubos (lb)	91800
Área Total de Transferência de Calor ( $ft^2$ )	44430
Condições de Vapor em Carga Máxima	
Fluxo de Vapor (lb/h)	3169000
Temperatura do Vapor (°F)	516
Pressão de Vapor (psig)	770
Refrigerante do Primário	
Fluxo de Refrigerante no Reator (lb/h)	33930000
Volume de Água de Refrigeração do Reator ( $ft^3$ )	928
Fluido do Secundário	
Temperatura da Água de Alimentação (°F)	435
Volume de Água no Secundário ( $ft^3$ )	1526
Volume de Vapor no Secundário ( $ft^3$ )	3203
Pressurizador	
Volume Total ( $ft^3$ )	1300
Capacidade do Aquecedor Elétrico (kW)	1300

Tabela 1: Dados do reator de H. B. Robinson

## 2) Características de Angra 1

Dados da Planta			
Tipo de Reator			PWR
Número de Geradores de Vapor			2
Número de Pressurizadores			1
Eficiência			33.60%
Parâmetros Térmicos e Hidráulicos do Núcleo			
Potência Térmica (MWth)			1876
Pressão Nominal do Sistema Primário (psi)			2250
Taxa de Fluxo de Refrigerante Total (lb/h)			71.1E+06
Velocidade Média do Refrigerante (ft/s)			16.1
Massa Total de Refrigerante no Primário (lb)			117863
Temperatura Nominal de Entrada do Refrigerante (°F)			551.5
Temperatura Nominal de Saída do Refrigerante (°F)			618.3
Área Superficial de Transferência de Calor Ativa ( $ft^2$ )			33300
Fluxo de Calor Médio ( $Btu/(hft^2)$ )			187100
Coeficiente de Transferência de Calor do Combustível para o Refrigerante ( $Btu/(hft^2°F)$ )			*176
Parâmetros Cinéticos			
Coeficiente Doppler pcm/ °F			-0.91E-05
Coeficiente de Temperatura do Moderador pcm/ °F			17.4
Coeficiente de Pressão do Moderador ( $\Delta k/k$ )/psi			*3.00E-06
Tempo de Vida dos Nêutrons Prontos ( $\mu s$ )			17.4
Fração de Nêutrons Retardados			0.0075
Constantes dos Nêutrons Retardados			
Vida Média (s)	Constante de Decaimento ( $\lambda_i, s^{-1}$ )		Fração
80.4	0.0124		0.000246
32.8	0.0305		0.001641
8.98	0.111		0.001465
3.32	0.301		0.002965
0.88	1.14		0.000867
0.332	3.01		0.000316

Características do Gerador de Vapor	
Gerador de Vapor	
Número de Tubos-U	5428
Diâmetros dos Tubos-U (in.)	0.750
Espessura Média das Paredes dos Tubos (in.)	0.043
Massa de Metal dos Tubos (lb)[16]	138300
Área Total de Transferência de Calor ( $ft^2$ )	77255
Condições de Vapor em Carga Máxima	
Fluxo de Vapor (lb/h)	4090000
Temperatura do Vapor (°F)	530
Pressão de Vapor (psig)	885
Refrigerante do Primário	
Fluxo de Refrigerante no Reator (lb/h)	35.5E+06
Volume de Água de Refrigeração do Reator ( $ft^3$ )	2473
Fluido do Secundário	
Temperatura da Água de Alimentação (°F)	430
Volume de Água no Secundário ( $ft^3$ )	3797.73
Volume de Vapor no Secundário ( $ft^3$ )	*3203
Pressurizador	
Volume Total ( $ft^3$ )	1000
Volume de Vapor ( $ft^3$ )	600
Capacidade do Aquecedor Elétrico (kW)	1000

Tabela 2: Dados do reator de Angra 1.

\* Por falta de dados de Angra 1, dados de HBR foram utilizados



## APÊNDICE II

Valores máximos encontrados no presente trabalho e na literatura referenciada.

Parâmetros	Valor Máximo	Tempo do Valor Máximo (s)
Variação da potência do reator em relação ao seu valor estacionário	10.63	4.9
Variação da concentração normalizada do grupo 1 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-2403	30
Variação da concentração normalizada do grupo 2 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-11150	3.1
Variação da concentração normalizada do grupo 3 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-8676	3
Variação da concentração normalizada do grupo 4 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-13810	2.5
Variação da concentração normalizada do grupo 5 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-2110	1.9
Variação da concentração normalizada do grupo 6 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-369.2	1.5
Variação da temperatura do combustível em relação ao seu valor estacionário	-7.476	2.8
Variação da temperatura do refrigerante no primeiro nodo em relação ao seu valor estacionário	1.26	0.8
Variação da temperatura do refrigerante no segundo nodo em relação ao seu valor estacionário	1.004	1.2
Variação da temperatura do refrigerante no GV em relação ao seu valor estacionário	0.1382	6.1
Variação da temperatura dos tubos de metal do GV em relação ao seu valor estacionário	0.9222	6.8
Variação da pressão de vapor no GV em relação ao seu valor estacionário	0.3226	10.4
Variação da temperatura do plenum superior do vaso de pressão em relação ao seu valor estacionário	0.4176	2.7
Variação da temperatura do plenum de entrada do GV em relação ao seu valor estacionário	0.4503	3.2
Variação da temperatura da perna quente em relação ao seu valor estacionário	0.377	4
Variação da temperatura do plenum de saída do GV em relação ao seu valor estacionário	0.1346	6.9
Variação da temperatura da perna fria em relação ao seu valor estacionário	0.1315	7.6
Variação da temperatura do plenum inferior do vaso de pressão em relação ao seu valor estacionário	2	0
Variação da pressão do pressurizador em relação ao seu valor estacionário	0.9304	25.8
Variação da potência dos aquecedores do pressurizador em relação ao seu valor estacionário	-0.1158	30
Variação da vazão de vapor em relação ao seu valor	0.3934	10.4

estacionário		
Variação da vazão da água de alimentação em relação ao seu valor estacionário	0.3934	10.4

Tabela 4: Valores máximos das respostas dinâmicas do Caso 1

Parâmetros	Valor Máximo	Tempo do Valor Máximo (s)
Variação da potência do reator em relação ao seu valor estacionário	-1.045	1.0
Variação da concentração normalizada do grupo 1 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-71.28	24.3
Variação da concentração normalizada do grupo 2 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-376.5	15.6
Variação da concentração normalizada do grupo 3 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-213	6.1
Variação da concentração normalizada do grupo 4 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-285.3	3.4
Variação da concentração normalizada do grupo 5 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-38.18	2.0
Variação da concentração normalizada do grupo 6 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-6.407	1.4
Variação da temperatura do combustível em relação ao seu valor estacionário	-0.3679	3.9
Variação da temperatura do refrigerante no primeiro nodo em relação ao seu valor estacionário	0.05387	1.5
Variação da temperatura do refrigerante no segundo nodo em relação ao seu valor estacionário	0.007835	8.3
Variação da temperatura do refrigerante no GV em relação ao seu valor estacionário	0.004078	16
Variação da temperatura dos tubos de metal do GV em relação ao seu valor estacionário	0.00338	17.1
Variação da pressão de vapor no GV em relação ao seu valor estacionário	0.01641	20.7
Variação da temperatura do plenum superior do vaso de pressão em relação ao seu valor estacionário	0.00756	10.8
Variação da temperatura do plenum de entrada do GV em relação ao seu valor estacionário	0.00771	11.0
Variação da temperatura da perna quente em relação ao seu valor estacionário	0.00754	11.9
Variação da temperatura do plenum de saída do GV em relação ao seu valor estacionário	0.00407	16.3
Variação da temperatura da perna fria em relação ao seu valor estacionário	0.004052	17.4
Variação da temperatura do plenum inferior do vaso de pressão em relação ao seu valor estacionário	2	0.0
Variação da pressão do pressurizador em relação ao seu valor estacionário	0.0146	0.8

Varição da potência dos aquecedores do pressurizador em relação ao seu valor estacionário	0.000231	6.0
Varição da vazão de vapor em relação ao seu valor estacionário	0.02	20.5
Varição da vazão da água de alimentação em relação ao seu valor estacionário	0.02	20.5

Tabela 5: Valores máximos das respostas dinâmicas do Caso 3

Parâmetros	Valor Máximo	Tempo do Valor Máximo (s)
Varição da potência do reator em relação ao seu valor estacionário	-323	141
Varição da concentração normalizada do grupo 1 de precursores em relação ao seu valor estacionário	54770	140
Varição da concentração normalizada do grupo 2 de precursores em relação ao seu valor estacionário	21050	140
Varição da concentração normalizada do grupo 3 de precursores em relação ao seu valor estacionário	60920	140
Varição da concentração normalizada do grupo 4 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-58230	144
Varição da concentração normalizada do grupo 5 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-9872	142
Varição da concentração normalizada do grupo 6 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-1847	141
Varição da temperatura do combustível em relação ao seu valor estacionário	44.05	140
Varição da temperatura do refrigerante no primeiro nodo em relação ao seu valor estacionário	3.7501	140
Varição da temperatura do refrigerante no segundo nodo em relação ao seu valor estacionário	4.701	140
Varição da temperatura do refrigerante no GV em relação ao seu valor estacionário	2.91	142
Varição da temperatura dos tubos de metal do GV em relação ao seu valor estacionário	2.268	143
Varição da pressão de vapor no GV em relação ao seu valor estacionário	9.917	144
Varição da temperatura do plenum superior do vaso de pressão em relação ao seu valor estacionário	4.596	140
Varição da temperatura do plenum de entrada do GV em relação ao seu valor estacionário	4.583	141
Varição da temperatura da perna quente em relação ao seu valor estacionário	4.582	140
Varição da temperatura do plenum de saída do GV em relação ao seu valor estacionário	2.899	143
Varição da temperatura da perna fria em relação ao seu valor estacionário	2.899	143
Varição da temperatura do plenum inferior do vaso de	2.876	144

pressão em relação ao seu valor estacionário		
Variação da pressão do pressurizador em relação ao seu valor estacionário	9.521	140
Variação da potência dos aquecedores do pressurizador em relação ao seu valor estacionário	4.352	151
Variação da vazão de vapor em relação ao seu valor estacionário	12.09	144
Variação da vazão da água de alimentação em relação ao seu valor estacionário	12.09	144

Tabela 6: Valores máximos das respostas dinâmicas do Caso 2

Parâmetros	Valor Máximo	Tempo do Valor Máximo (s)
Variação da potência do reator em relação ao seu valor estacionário	-237.6	141
Variação da concentração normalizada do grupo 1 de precursores em relação ao seu valor estacionário	25000	140
Variação da concentração normalizada do grupo 2 de precursores em relação ao seu valor estacionário	91870	140
Variação da concentração normalizada do grupo 3 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-32670	146
Variação da concentração normalizada do grupo 4 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-57760	143
Variação da concentração normalizada do grupo 5 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-9024	141
Variação da concentração normalizada do grupo 6 de precursores em relação ao seu valor estacionário	-1713	141
Variação da temperatura do combustível em relação ao seu valor estacionário	55.04	140
Variação da temperatura do refrigerante no primeiro nodo em relação ao seu valor estacionário	5.2	140
Variação da temperatura do refrigerante no segundo nodo em relação ao seu valor estacionário	6.446	140
Variação da temperatura do refrigerante no GV em relação ao seu valor estacionário	3.95	143
Variação da temperatura dos tubos de metal do GV em relação ao seu valor estacionário	3.371	143
Variação da pressão de vapor no GV em relação ao seu valor estacionário	16.78	145
Variação da temperatura do plenum superior do vaso de pressão em relação ao seu valor estacionário	6.367	141
Variação da temperatura do plenum de entrada do GV em relação ao seu valor estacionário	6.346	142
Variação da temperatura da perna quente em relação ao seu valor estacionário	6.3540	141
Variação da temperatura do plenum de saída do GV em relação ao seu valor estacionário	3.936	144

Varição da temperatura da perna fria em relação ao seu valor estacionário	3.936	144
Varição da temperatura do plenum inferior do vaso de pressão em relação ao seu valor estacionário	3.913	143
Varição da pressão do pressurizador em relação ao seu valor estacionário	0.9131	140
Varição da potência dos aquecedores do pressurizador em relação ao seu valor estacionário	0.3687	145
Varição da vazão de vapor em relação ao seu valor estacionário	20.47	145
Varição da vazão da água de alimentação em relação ao seu valor estacionário	20.47	145

Tabela 7: Valores máximos das respostas dinâmicas do Caso 4

Parâmetros	Valor Máximo	Tempo do Valor Máximo
Varição da potência do reator em relação ao seu valor estacionário	-67	1
Varição da temperatura do combustível em relação ao seu valor estacionário	-6.6	3
Varição da temperatura do refrigerante no segundo nodo em relação ao seu valor estacionário	1	1.2
Varição da pressão de vapor no GV em relação ao seu valor estacionário	-1.2	17

Tabela 8: Valores máximos aproximados das respostas dinâmicas do modelo da ref. [6].

Parâmetros	Valor Máximo	Tempo do Valor Máximo
Varição da potência do reator em relação ao seu valor estacionário	0.18%	140
Varição da temperatura do combustível em relação ao seu valor estacionário	1.9	140
Varição da temperatura da perna quente em relação ao seu valor estacionário	0.3	140
Varição da temperatura da perna fria em relação ao seu valor estacionário	0.006	140
Varição da potência dos aquecedores do pressurizador em relação ao seu valor estacionário	-0.014	140
Varição da vazão da água de alimentação em relação ao seu valor estacionário	-0.04	140

Tabela 9: Valores máximos aproximados das respostas dinâmicas do modelo da ref. [14].