

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA ESTUDO DO SISTEMA DE CONTROLE DO REATOR EM PLANTAS PWR

José Ricardo de Oliveira * e Adalberto José Soares **

* Aluno do curso de Pós-Graduação do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
(Universidade de São Paulo)

** Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN / CNEN / SP-Caixa Postal 11049
São Paulo / Brasil - CEP: 05499-970

RESUMO

Neste trabalho, é apresentado um programa computacional desenvolvido para aplicação específica ao estudo do sistema de controle do reator de uma planta típica PWR. Com a função básica de simular transientes de potência, o programa tem a seguinte estrutura: (1) um modelo matemático representativo dos comportamentos dinâmico e estacionário do circuito primário; (2) um conjunto de equações associadas às malhas de controle de potência do reator e de pressão do sistema; (3) telas para entrada de dados de referência e de parâmetros dos blocos de controle e do módulo de programação de velocidade de barra; (4) tela principal de entrada para configuração da função excitação/ transiente, do tempo de simulação e do modo de controle; e (5) saída gráfica de todas as variáveis de processo incorporadas ao modelo. Para o carregamento do programa, foram utilizados constantes termo-hidráulicas e dados de projeto obtidos da bibliografia de referência e adaptados para uma concepção particular de pequenas unidades PWR. São apresentados resultados para simulações em malha aberta e com o sistema de controle incorporado.

Keywords: control system, simulator, PWR systems, dynamic response.

I. INTRODUÇÃO

O objetivo de um sistema de controle em uma instalação nuclear é permitir que a mesma acompanhe as variações de carga exigidas, garantindo-se o retorno à condição de equilíbrio sem atingir nenhum limite ou restrição de projeto. Para unidades termonucleares PWR comerciais típicas, o sistema de controle deve ser projetado para operar seguramente no modo automático, suportando transientes em degraus de até $\pm 10\%$, com o reator operando entre 15 a 100% de sua capacidade nominal [1,2].

Definido o projeto básico da instalação em todos os seus aspectos, e, considerando-se os altos custos envolvidos e os rígidos critérios de segurança, torna-se então fundamental o desenvolvimento de ferramentas adequadas para o estudo do sistema de controle incorporado à planta. Nesse contexto, apresentam-se os simuladores como os principais auxiliares para definição da estratégia de controle a ser implementada e para o estudo e determinação dos parâmetros estabelecidos nas diversas malhas e blocos de controle.

Especificamente, neste trabalho, desenvolveu-se um programa computacional para operar em PC e em ambiente Windows, com processador Pentium 100 ou superior. Buscou-se o atendimento aos seguintes requisitos:

- Algoritmo de controle incorporado, considerando-se o esquema típico de blocos computacionais empregados em unidades PWR [1];
- Visualização gráfica da resposta temporal à aplicação de um transitório de potência, considerando-se as principais grandezas envolvidas com o estudo do sistema de controle do reator e tomando-se a planta em malha aberta ou com o sistema de controle incorporado.
- Interface para escolha do transitório a ser aplicado na simulação e para ajuste dos parâmetros de controle.

A partir das leis básicas de conservação, desenvolveu-se um modelo matemático para cada componente considerado do conjunto reator mais circuito primário de refrigeração. Para o comportamento neutrônico do reator optou-se pela equação de cinética pontual; para o estudo termo-hidráulico do circuito primário aplicaram-se as leis de conservação de massa e energia. No equacionamento do pressurizador considerou-se a aproximação com dois volumes de controle, o inferior com líquido saturado ou sub-resfriado e o superior com vapor saturado ou superaquecido. Não foram modelados os instrumentos incorporados às malhas de controle estudadas.

Como premissas para o desenvolvimento do trabalho adotou-se:

- O circuito primário é representado por um "Loop" refrigerante.

- b) Não foi considerado no simulador nenhum equipamento ou sistema do circuito secundário.
- c) As equações matemáticas utilizadas e as discretizações definidas foram simplificadas, sem perda das precisões exigidas para o estudo, e, rigorosamente baseadas em trabalhos apresentados na bibliografia de referência.
- d) A vazão do circuito primário foi considerada constante – e nominal - durante o período de simulação.
- e) A simulação é realizada a partir de transientes estabelecidos no gerador de vapor, adotando-se uma correção/ atraso necessário para representar as variações de potência da turbina.

II. MODELO MATEMÁTICO

Reator. Para representação do comportamento neutrônico do reator adotou-se o modelo da cinética pontual, considerando-se seis grupos de nêutrons atrasados, cujas equações são apresentadas a seguir [1, 2, 3, 4]:

$$\frac{dP}{dt} = \left(\frac{\mathbf{r} - \mathbf{b}}{\Lambda} \right) P + \sum_{i=1}^6 I_i C_i \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\mathbf{b}_i}{\Lambda} P - I_i C_i \quad (2)$$

onde :

\mathbf{r} - Reatividade do núcleo.

\mathbf{b} - Fração total de nêutrons atrasados.

\mathbf{b}_i - Fração correspondente ao i -ésimo grupo de nêutrons atrasados.

L - Tempo relativo à geração de nêutrons.

I_i - Constante de decaimento para o i -ésimo grupo de nêutrons atrasados.

P - Potência normalizada do reator

C_i - Variável proporcional à concentração do i -ésimo isótopo precursor que, no decaimento, resulta em nêutrons atrasados.

Sobre a reatividade considerou-se no modelo os efeitos de realimentação devido às temperaturas do refrigerante e do combustível e à pressão do circuito primário. O modelo não leva em consideração os efeitos do Xenônio (Xe^{135}) e do Samário (Sm^{149}). Todo o conjunto de barras de controle é movido simultaneamente, em velocidade constante e definida de acordo com um programa configurável em tela de entrada de dados.

No equacionamento termo-hidráulico do reator, considerou-se o escoamento monofásico em canal único à vazão constante e com a temperatura do combustível, T_F , uniforme em toda superfície de troca de calor. A partir do balanço de energia, adotando-se um nodo representando o combustível e dois nodos representando o refrigerante, chegou-se às seguintes equações para o refrigerante [5] :

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{F_1}{(mc_p)_{nó1}} P + \frac{1}{2R(mc_p)_{nó1}} (T_F - T_1) + \frac{2}{\Gamma} (T_{Re} - T_1) \quad (3)$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{F_2}{(mc_p)_{nó2}} P + \frac{1}{2R(mc_p)_{nó2}} (T_F - T_1) + \frac{2}{\Gamma} (T_1 - T_2) \quad (4)$$

onde :

T_1 : Temperatura do primeiro nodo do refrigerante, após plenum de entrada.

T_2 : Temperatura do segundo nodo do refrigerante, à jusante do primeiro nodo.

T_{Re} : Temperatura do refrigerante no *plenum* de entrada do reator.

F_i : Fração da energia gerada que é liberada diretamente no nodo “ i ”.

m : Massa do refrigerante correspondente ao nodo “ i ”.

c_p : Calor específico do refrigerante

R : Resistência à transferência de calor do combustível para o refrigerante

Γ - Tempo de residência do fluido no nodo “ i ”

$$e : \quad R = \frac{1}{UA} \quad (5) \quad ; \quad \Gamma = \frac{2m}{W_a} \quad (6)$$

A : Área total de troca de calor no reator.

U : Coeficiente de troca de calor entre o combustível e o refrigerante.

W_a : Vazão mássica do refrigerante pelo núcleo.

Para o combustível, tem-se [5] :

$$\frac{dT_F}{dt} = \frac{F_F}{m_F c_{p(F)}} P - \frac{1}{Rm_F c_{p(F)}} (T_F - T_1) \quad (7)$$

onde :

F_F : Fração do total da energia produzida no reator que é transferida ao refrigerante por convecção

m_F : Massa total do combustível

$c_{p(F)}$: Calor específico do combustível

Pressurizador. Na formulação do modelo termodinâmico do pressurizador tomou-se como referência estudos específicos relativos ao equipamento [6, 7], observando-se hipóteses simplificadoras em função das propostas deste trabalho. Para compor a malha de controle, incorporou-se ao modelo um aquecedor proporcional e outro de retaguarda, um conjunto de válvulas de aspersão (spray) e uma válvula de alívio. Os componentes considerados no equacionamento do modelo, bem como os sentidos de fluxo correspondentes, estão indicados na fig. 1 e relacionados a seguir:

W_{su} - Fluxo de surto, resultado das variações de temperatura no circuito primário.

W_{sp} - Fluxo de água proveniente da perna fria e pulverizada através da válvula de aspersão.

W_{re} - Fluxo através da válvula de alívio de vapor, a ser estabelecido por ocasião de pressão muito alta.

W_{cs} - Fluxo de condensado resultante da ação das gotículas de água geradas pelo spray sobre o vapor no volume superior.

W_{co} - Taxa de massa que se condensa do volume superior.
 W_{ev} - Taxa de massa vaporizada do volume líquido.
 Q_h - Potência fornecida pelos aquecedores.

Aplicando-se as equações de balanço de massa e de energia nos dois volumes de controle, chega-se a um conjunto de equações diferenciais ordinárias representativas das variações de massa e de entalpia em cada volume de controle. A equação final de pressão é apresentada a seguir, observando-se que os subscritos “g” e “l”, referem-se ao vapor e ao líquido, respectivamente.

$$\frac{dP_p}{dt} = - \frac{M_l \left(\frac{\partial v_l}{\partial h_l} \right) \frac{dh_l}{dt} + v_l \frac{dM_l}{dt} + M_g \left(\frac{\partial v_g}{\partial h_g} \right) \frac{dh_g}{dt} + v_l \frac{dM_l}{dt}}{M_g \left(\frac{\partial v_g}{\partial P_p} \right) + M_l \left(\frac{\partial v_l}{\partial P_p} \right)} \quad (8)$$

onde:

P_p : Pressão no pressurizador.

M : Massa de líquido ou de vapor no pressurizador.

h : Entalpia.

V : Volume do líquido ou do vapor no pressurizador.

v : volume específico.

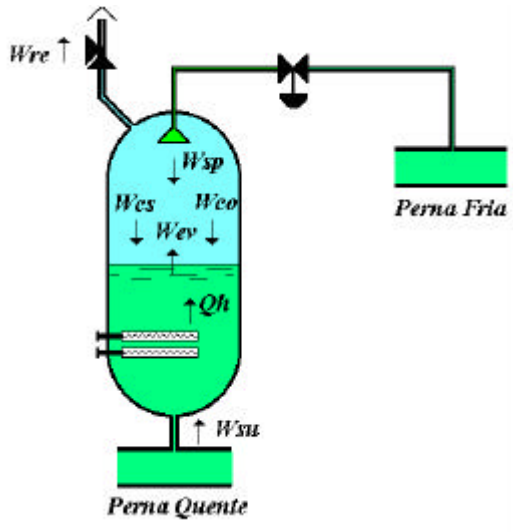


Figura 1. Processos de Transferência de Massa e Energia do Modelo do Pressurizador.

A vazão de surto W_{su} é a função de excitação para o estudo do comportamento transitório do pressurizador, e é resultado da expansão ou contração do refrigerante no circuito primário. Neste modelo, ela é formulada como [5]:

$$W_{su} = W_{su0} + \sum_i \left(\frac{m}{v_l} \right) \left(\frac{\partial v_l}{\partial T} \right) \frac{dT_i}{dt} \quad (9)$$

sendo,

W_{su0} – Vazão de surto inicial ou de regime.

v_{li} - Volume específico do refrigerante no “i-ésimo” nodo.

m_i - Massa do refrigerante no “i-ésimo” nodo.

T_i - Temperatura do refrigerante no “i-ésimo” nodo .

Pernas e plenums. Basicamente, para cada nodo correspondente a uma perna ou um *plenum*, considerou-se como modelo matemático uma equação diferencial correspondente a um atraso de transporte de primeira ordem para a temperatura [5]. Na forma geral, tem-se:

$$\frac{dT_{nodo}}{dt} = \frac{1}{t_{nodo}} T_{anterior} - \frac{1}{t_{nodo}} T_{nodo} \quad (10)$$

sendo T_{nodo} e $T_{anterior}$ as temperaturas representativas da perna ou plenum considerado e a temperatura do nodo adjacente anterior, respectivamente. O tempo de trânsito é dado por :

$$t_{nodo} = \frac{m_{nodo}}{W_a} \quad (11)$$

Gerador de Vapor. Para acoplamento do circuito primário ao circuito secundário, adotou-se a seguinte equação simplificada, baseada no princípio de conservação de energia:

$$\frac{dT_{GV}}{dt} = \frac{1}{t_{GV}} (T_{Gve} - T_{GV}) - \frac{P_{SEC}}{m_{GV} c_p} \quad (12)$$

onde :

T_{GV} : Temperatura do nodo representativo do refrigerante no interior do gerador de vapor

T_{Gve} : Temperatura do nodo representativo do refrigerante no “plenum” de entrada do gerador de vapor

t_{GV} : Tempo de residência do refrigerante no interior do gerador de vapor.

P_{SEC} : Potência removida pelo lado secundário.

m_{GV} : Massa do refrigerante no interior do GV

Para utilização de P_{SEC} como função de excitação para o estudo do sistema de controle do reator, definiu-se uma função secundária de ajuste para possibilitar a compensação de perdas e atrasos de transporte; e, dessa forma, aproximar-se da condição de aplicação de transitório diretamente na turbina.

III. SISTEMA DE CONTROLE

Introdução. No programa elaborado, os coeficientes de realimentação de reatividade e os coeficientes da função que determina a reatividade de barra são dados de entrada para configuração da planta. O programa de velocidade de barras também é configurado através de tela de entrada. Para completar a estratégia de controle do reator, foram implantadas no programa duas malhas de controle com

configurações típicas normalmente empregadas em unidades PWR, e que devem ter seus parâmetros ajustados para garantir a operação adequada do reator no modo automático, obedecendo ao programa estabelecido para a temperatura média do refrigerante.

Sistema de controle do Reator. O diagrama de blocos da malha de controle de potência do reator está apresentado na Fig.2. Comparando-se com uma malha de controle genérica, pode-se dividir funcionalmente o conjunto de blocos em três partes, a saber: (1) entrada de sinais, constituídos pelos blocos representativos das medições de potência da turbina, potência do reator e temperaturas das pernas fria e quente; (2) blocos de controle, representados pelos blocos matemáticos relacionados a ajuste de ganhos, compensação de sinais e de programas de controle; e (3) elemento final de controle, no caso representado pelos blocos de programação de velocidade e de acionamento de barras.

Todos os parâmetros associados aos blocos são implantados/ modificados a partir de telas de entrada.

Sistema de controle de pressão. O controle de pressão do circuito primário é realizado no pressurizador. O bloco principal de controle constitui-se de uma lógica com algoritmo “proporcional + integral”, atuando sobre os aquecedores e válvula de aspersão, a partir do sinal de erro entre a pressão do pressurizador e a pressão de referência. Assim como a malha de controle do reator, todos os parâmetros podem ser ajustados a cada simulação, utilizando-se uma das telas próprias de entrada de dados.

IV. O PROGRAMA COMPUTACIONAL

Rotinas de cálculo numérico. Para integração numérica do conjunto de equações diferenciais ordinárias, desenvolveu-se uma sub-rotina baseada no método de Runge-Kutta de quarta ordem. Para as constantes termodinâmicas foram criadas tabelas considerando-se as faixas típicas de pressão e temperatura associadas a plantas PWR.

Telas de entrada e de saída. O programa dispõe de telas específicas de entrada para configuração básica da planta, seleção do modo de controle do reator (malha aberta ou malha fechada), definição do programa de temperatura média, especificação de parâmetros de controle e de segurança, definição do tipo (degrau ou rampa) e nível do transitório (em % ou %/min), e duração da simulação. Na tela principal, visualizam-se na forma gráfica, as principais grandezas associadas ao circuito primário, tais como, pressão, temperaturas do refrigerante e do combustível, nível no pressurizador, posição da barra de controle, potência solicitada e potência do reator. Concluída a simulação, permanecem disponíveis todos os dados para geração de gráficos em tela específica para esse fim.

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Planta básica para teste. Para obtenção dos resultados iniciais, foi implantado no programa um conjunto de dados de projeto característico de uma instalação típica PWR. Foram executadas simulações em malha aberta e em malha fechada, observando-se tempos de simulação da ordem de 500 a 1000 segundos, com intervalo de integração de 0,01 e 0,001 segundo.

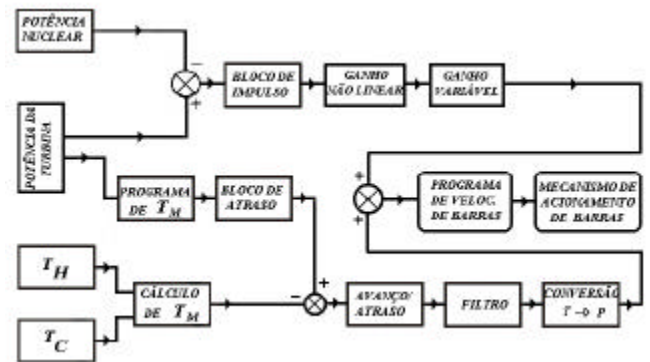


Figura 2. Diagrama de Blocos da Malha de Controle de Potência do Reator.

Simulação em malha aberta. Com a simulação em malha aberta, fazendo-se o sistema de controle do reator inoperante e estabelecendo-se degraus de $\pm 10\%$ de potência no lado secundário, buscou-se observar o aspecto qualitativo da resposta e a correspondência com o modelo matemático implantado. Na Fig. 3 são mostradas as curvas obtidas para a temperatura média normalizada do refrigerante.

Simulação em malha fechada. Um prévio estudo dos blocos de controle incorporados ao programa permitiu a definição de faixas de valores aplicáveis a cada parâmetro. Testes foram realizados, variando-se os principais parâmetros das malhas de controle nos dois modos de operação possíveis (temperatura média constante e variável). Diversas configurações para o programa de velocidade de barras foram testadas, buscando-se ajustar uma condição adequada para a planta incorporada ao programa. Utilizou-se excitação degrau padrão de $\pm 10\%$ de potência. Nas Fig. 4 e Fig. 5 mostram-se simulações de $+10\%$ e -10% , com o sistema de controle atuando para manter o programa de temperatura média constante.

Resposta para transientes em rampa. Visando-se uma comparação com o simulador Simpcio[8], implantou-se no programa os mesmos coeficientes de realimentação de reatividade utilizados naquele simulador e, mantendo-se o programa de temperatura média constante, foram estabelecidos transitórios em rampa de $\pm 15\%/min$. Para complementar o estudo, realizou-se também simulações em malha aberta. Na Fig. 6, estão apresentadas, no mesmo gráfico, as respostas em malha aberta e em malha fechada para uma excitação de $+15\%$.

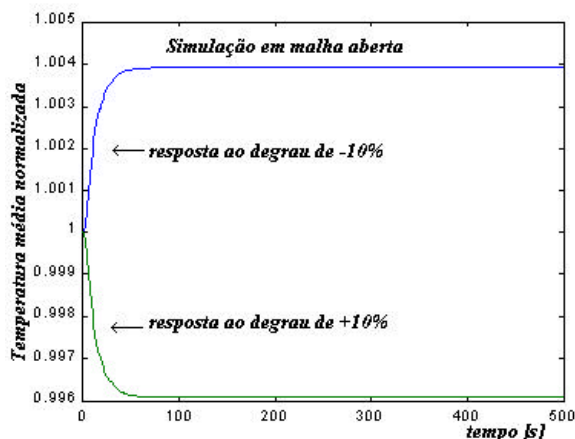


Figura 3. Resposta à Excitação Degrau em Malha Aberta – Temperatura Média do Refrigerante.

Malha de controle de pressão. Para o pressurizador incorporado ao programa, observaram-se variações de pressão inferiores a 2 % para simulações em degrau de $\pm 10\%$ de potência. Ajustando-se, por processo de tentativa e erro, o tempo de integração e o ganho da malha, buscou-se a melhor configuração para operação. A Fig. 7 apresenta os resultados de simulações realizadas com a constante de integração do controlador ajustada em 10 e em 100 segundos, observando-se o mesmo ganho e a mesma configuração da planta, com excitação padrão de +10% em degrau. O aumento da constante de tempo de integração torna o controle mais ‘suave’, evitando oscilações; em contrapartida, a estabilização é mais demorada.

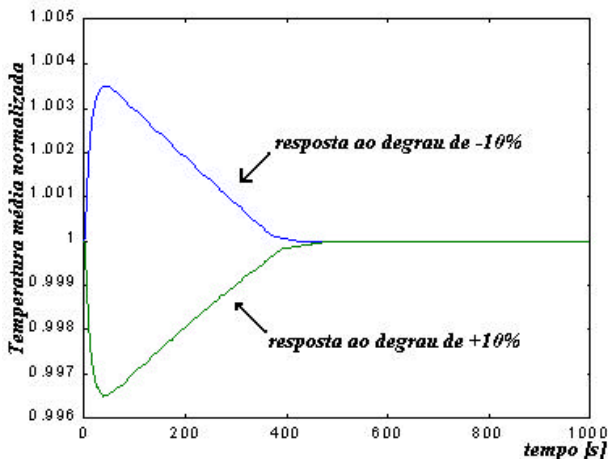


Figura 4. Resposta à Excitação Degrau em Malha Fechada - Temperatura Média do Refrigerante.

VI. CONCLUSÕES

O modelo matemático. Utilizando-se de simulações em malha aberta, aplicando-se excitação no circuito secundário, verificou-se que o modelo matemático está respondendo conforme esperado. Observe-se que para uma avaliação quantitativa com precisão, faz-se necessário o carregamento do programa com dados idênticos aos de um

simulador utilizado como referência. Os testes com excitação em rampa de 15%/min (Fig. 7) mostraram-se compatíveis com os resultados apresentados na referência [8].

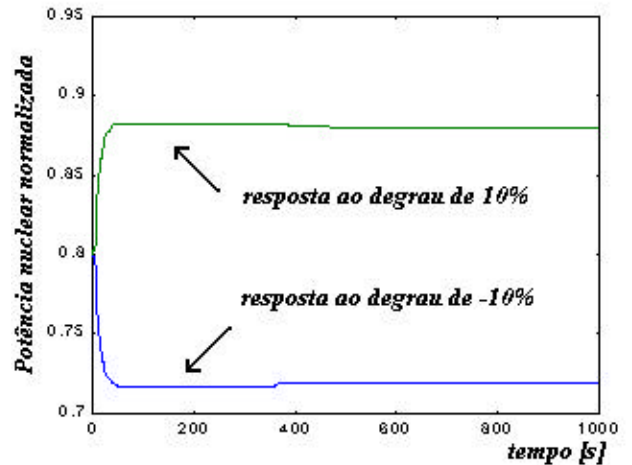


Figura 5. Resposta à Excitação Degrau em Malha Fechada – Potência Nuclear.

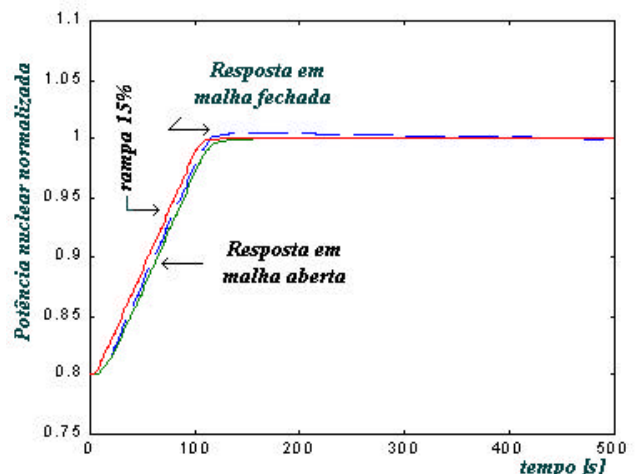


Figura 6. Resposta à Variação de Potência em Rampa de 15 % / min.

Ajuste dos parâmetros de controle. No sistema de controle estudado, constituído de blocos simples de compensação e sem a incorporação de qualquer técnica avançada de controle, cada parâmetro configurado deve ser cuidadosamente avaliado para que sejam evitadas oscilações e sobre-potências indesejáveis ao controle e que ultrapassem os limites de segurança da planta. A flexibilidade do programa computacional, permitindo a variação dos coeficientes de realimentação de reatividade e dos parâmetros do programa de velocidade de barras utilizando-se de telas de entrada, mostrou-se útil para a avaliação das dificuldades associadas ao projeto do sistema de controle do reator. Nas simulações realizadas com a planta controlada obedecendo a um programa de temperatura média constante, tem-se uma elevação de potência acima do valor nominal, ocasionada pela barras de

controle agindo no sentido de se eliminar os erros de potência e de temperatura média do refrigerante. Testes exaustivos com todos os parâmetros devem ser realizados para justificar a ação de controle contra a opção simples do “autocontrole”, estabelecido pela realimentação de reatividade devidas às variações de pressão e de temperaturas, ou seja, operação em malha aberta.

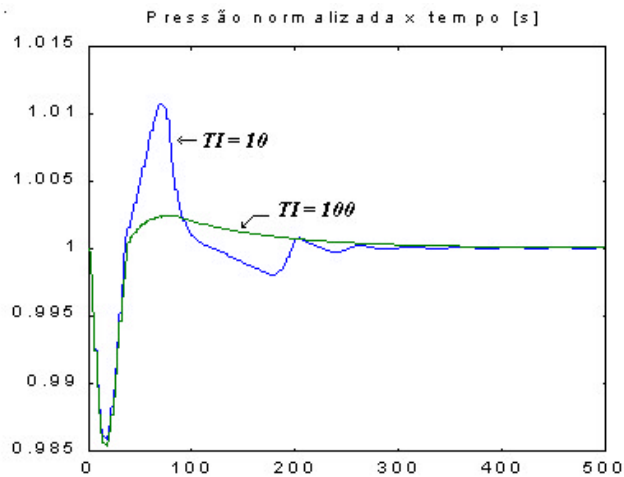


Figura 7: Resposta da Malha de Controle de Pressão para Constantes de Integração de 10 e 100 s.

REFERÊNCIAS

- [1] Harrer, J.M. and Beckerley, J.G., **Nuclear Power Reactor Instrumentation Systems**, vol. 2, U.S. Atomic Energy Commission, 1973.
- [2] Duderstadt, J.J. and Hamilton, L.J., **Nuclear Reactor Analysis**, John Wiley & Sons, 1976.
- [3] Schultz, M.A., **Control of Nuclear Reactors and Power Plants**, MacGraw-Hill Book Company, inc., 1955.
- [4] Weaver, Lynn E., **Reactor Dynamics and Control**, American Elsevier Publishing Company, inc., 1968.
- [5] Kerlin, T.W. and Katz E.M., **Theoretical and experimental dynamic analysis of the H. B. Robinson Nuclear Plant**, University of Tennessee, abril/1976.
- [6] Woiski, E.R., **Simulação do modelo termodinâmico de pressurizador típico PWR em regime transiente por meio do programa CSMP**, Dissertação de mestrado – IPEN, 1981.
- [7] Bruel, Renata B., **Análise de sensibilidade de um modelo teórico do pressurizador**, Dissertação de mestrado – IPEN, 1997.
- [8] Rubin, Gerson A., Soares, Adalberto J., **Simpco – Uma ferramenta para estudo de sistemas de controle de Centrais Nucleares**, CNEN / IPEN, 1995.

ABSTRACT

In this work a computational program is presented which has been developed for specific application on the study of the reactor control system of a typical PWR plant. As to the basic function of simulating power transients the program has the following structure: (1) a representative mathematical model of the dynamic and stationary behaviors of the primary circuit; (2) a group of equations associated to the reactor power control and system pressure control; (3) screens for the entry of reference data as well as of control blocks and control bar speed programming module parameters; (4) main entering screens for the configuration of the excitement/transient function as well as of simulation time and control mood; and (5) graphical output of all the process variables incorporated to the model.

As premise it has been considered as sufficient the modeling of the primary circuit, a differential equation being used which associates the average temperature of the coolant within the steam generator with the potency transferred to the secondary circuit, denominated “secondary potency”, as an interface with the secondary circuit. Every transient – ramp or step – is established upon the “turbine power” variable, which in turn is related to the “secondary power” variable by means of a differential equation that represents a first –order delay, having adjustable parameters on the data- entry screen. In the neutronic model as defined for the reactor, the reactivity feedback effects due to primary circuit pressure variation, as well as fuel and coolant temperature variation, were taken into consideration.

Thermo-hydraulics constants and project data taken from the available bibliography, adapted to a particular small PWR unit conception, were employed for loading the program.

With the open-loop simulation results a positive qualitative evaluation of the program was obtained, in comparison to published results related to simulators bearing equal purposes, more specifically the SIMPCO program. Having the control incorporated, one studied the main control parameters and the system behavior for several programs on the average coolant temperature.

For solving the differential ordinary equations one employed numerical integration sub-routines based on the Runge-Kutta 4 method.