

# SIMPCO - UMA FERRAMENTA PARA ESTUDO DE SISTEMAS DE CONTROLE DE CENTRAIS NUCLEARES

Gerson A. Rubin\* e Adalberto J. Soares\*

\*Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)  
Caixa Postal 11049, CEP 05422-970, São Paulo, SP, Brasil  
e-mail: garubin@net.ipen.br  
e-mail: ajsoares@net.ipen.br

## RESUMO

O SIMPCO - SIMulador para Projeto de Control e é um programa computacional que simula os circuitos primário e secundário de uma instalação nuclear tipo PWR, com a finalidade de permitir o estudo de estratégias de controle e o projeto de malhas de controle da instalação. Escrito em linguagem Turbo-Pascal para microcomputadores, contempla a modelagem dos principais componentes da instalação e permite a visualização na tela, de até 8 variáveis selecionadas durante a inicialização, além de gravar dados em arquivos para posterior processamento.

## INTRODUÇÃO

A definição da estratégia de controle de uma central nuclear, bem como o ajuste de suas malhas de controle, é uma atividade complexa que deve iniciar junto com o projeto da instalação.

Para melhor estudar o comportamento dinâmico da instalação, são desenvolvidos programas computacionais que simulam este comportamento em situações de transientes.

Eventos transientes em centrais nucleares envolvem interações bastante complicadas entre os diversos componentes, como: reator, circuito primário, gerador de vapor, turbinas, etc.

Os processos físicos que contribuem para a dinâmica da planta incluem a neutrônica do núcleo, os fenômenos termo-hidráulicos, a transferência de calor e o regime de escoamento do fluido refrigerante.

A dinâmica do sistema é, ainda, influenciada por eventos iniciados pelos sistemas de controle e proteção da planta, seja automaticamente ou em resposta a uma ação do operador.

Em geral, as análises do comportamento dinâmico de plantas nucleares são realizadas utilizando-se programas computacionais com modelos detalhados que permitem um acoplamento dos processos termo-hidráulicos, neutrônicos e dos sistemas de controle.

Entretanto, devido ao porte dos programas desenvolvidos, esses códigos apresentam um grau de

complexidade, tempo de execução e requisitos de memória que restringe seu uso a computadores de grande porte.

Visando a obtenção de uma ferramenta simples para auxiliar o projetista a entender o comportamento dinâmico de uma central nuclear e estabelecer os parâmetros das principais malhas de controle da mesma, foi desenvolvido um programa simplificado que simula os circuitos primário e secundário, o reator, o pressurizador, o gerador de vapor, a turbina, o condensador, as bombas e as principais malhas de controle da central.

Este programa, denominado SIMulador para Projeto de Control e (SIMPCO), foi escrito em linguagem Turbo-Pascal para microcomputadores IBM/PC e inclui além de saída gráfica em tela, a geração de arquivos em disco para processamento posterior.

## MODELAGEM DA PLANTA

No programa SIMPCO são simulados os principais componentes de uma planta PWR, tais como: reator, pressurizador, gerador de vapor tipo tubos-U, perna quente, perna fria, linha de vapor, turbinas, condensador, linha de condensado e bombas.

O programa SIMPCO possui ainda, elementos do sistema de controle e proteção relevantes para a operação segura da planta, como: controle de movimentação de barras do reator, controle de pressão do pressurizador, controle de nível no gerador de vapor, controle de pressão na linha de vapor, controle de pressão no condensador,

controle de vazão na linha de condensado e sistema de proteção do reator.

**Características Gerais.** O diagrama esquemático da

planta modelada é apresentado na Fig. 1, mostrando que o modelo é projetado para simular 2 circuitos de resfriamento do reator e um circuito no lado secundário, alimentando uma turbina.

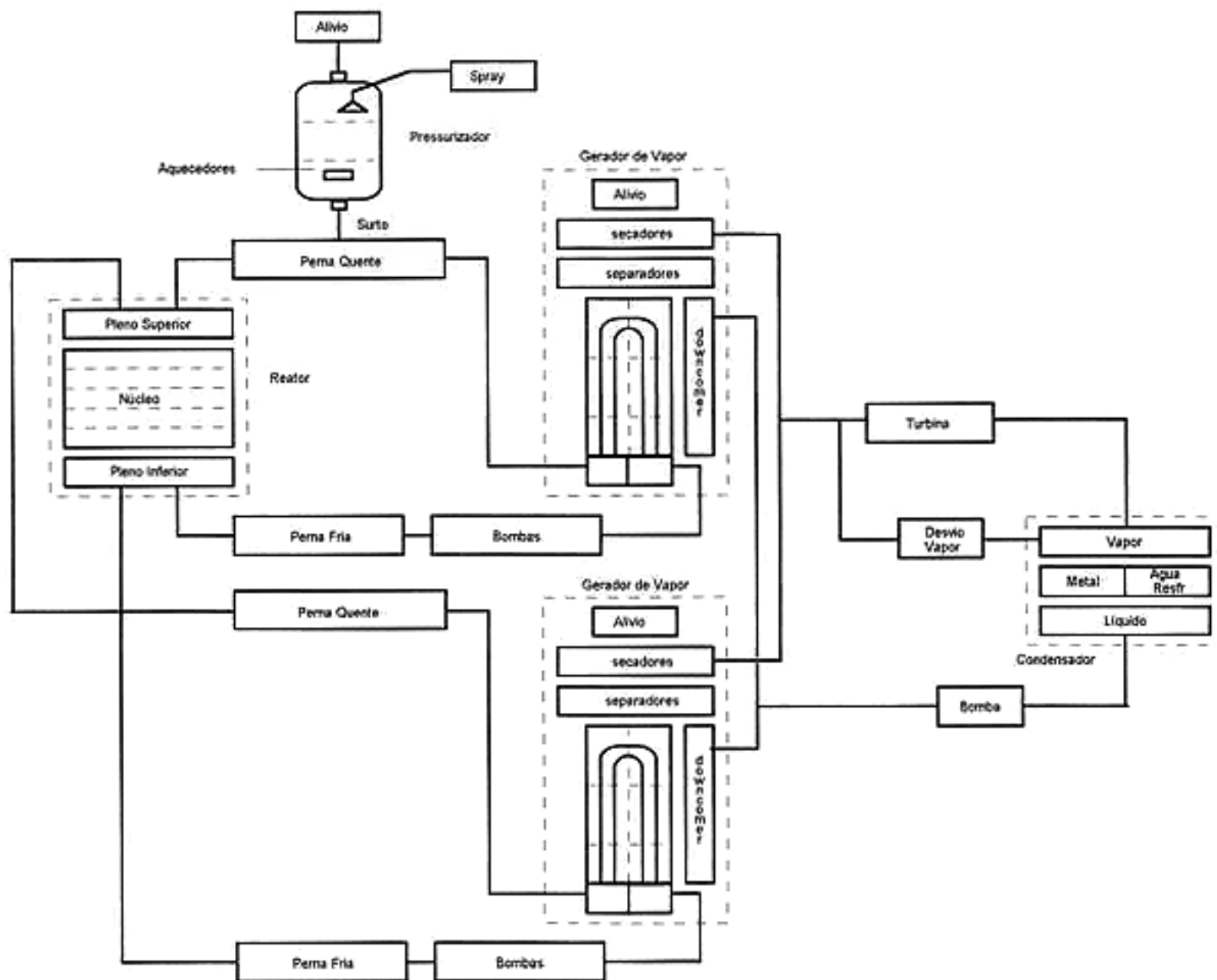


Figura 1. Diagrama Esquemático da Planta Modelada.

A modelagem dos componentes baseia-se nos princípios de conservação de massa, momento e energia.

Cada componente e respectivo sistema de controle é modelado como um módulo separado. Os fenômenos termo-hidráulicos e de transferência de calor em cada componente são modelados dividindo o componente em volumes de controle e usando as equações de conservação de massa e energia. Estas equações são transformadas em equações diferenciais ordinárias de primeira ordem dependentes do tempo.

Assume-se que o regime de escoamento no lado do primário permanece em fase única em todas as condições de operação. A presença de vapor ocorre apenas no pressurizador, onde é condensado antes de entrar na tubulação.

No lado do secundário, o vapor é assumido saturado e a água de alimentação subresfriada, em todas as condições operacionais.

**Características dos Componentes.** A seguir, são apresentadas as principais características de cada componente que integra o programa SIMPCO.

**Reator.** No programa SIMPCO, a critério do usuário, o reator pode ser representado por um nó radial e dois nós axiais, ou uma combinação de até 8 nós radiais e 5 nós axiais. Em todos os casos o usuário pode optar por 6 grupos de precursores de nêutrons ou por 1 grupo de precursores e 6 grupos para a geração de calor de decaimento, baseado na teoria de cinética pontual. O modelo considera realimentação de reatividade por efeito da temperatura do combustível, temperatura do moderador e movimentação das barras de controle. O modelo não leva em conta os efeitos da variação da concentração de xenônio.

**Pressurizador.** O modelo do pressurizador considera 3 volumes de controle: um volume para a região de vapor e

dois volumes para a região de líquido, em condição de não equilíbrio termodinâmico em todos os volumes. As equações dos balanços de massa e energia incluem as contribuições da vazão de aspersão, da vazão na linha de surto, da vazão de alívio e da potência dos aquecedores elétricos.

Gerador de Vapor. A modelagem do gerador de vapor do tipo tubos-U é formulada considerando 6 volumes de controle para o lado do primário, 6 volumes para os tubos metálicos e 6 volumes para o lado do secundário, sendo 3 volumes para o líquido, 1 volume para o "downcomer", 1 volume para os separadores de vapor e 1 volume para o secador de vapor.

Perna Quente. O modelo adotado para a perna quente considera apenas 1 volume de controle, com escoamento unidirecional e fase única.

Perna Fria. O modelo adotado para a perna fria considera apenas 1 volume de controle, com escoamento unidirecional e fase única. A vazão de aspersão do pressurizador é devidamente considerada nas equações de balanço de massa e energia.

Linha de Vapor. O modelo da linha de vapor considera o equilíbrio quase-estático a cada instante após a variação das condições do gerador de vapor e da turbina, desprezando-se as variações de energia cinética e potencial no balanço de energia.

Turbina. A turbina é modelada através de suas curvas de performance, por meio da interpolação linear de tabelas que correlacionam vazão e pressão em função das condições operacionais determinadas pela demanda de potência.

Condensador. O modelo do condensador considera três volumes de controle, sendo 1 volume para o líquido e vapor saturados, 1 volume para a água de resfriamento e 1 volume para os tubos metálicos do sistema de resfriamento.

Linha de Condensado. O modelo da linha de condensado considera escoamento unidirecional, permanente, adiabático e isotérmico, fluido incompressível, coeficiente de atrito constante ao longo da linha e despreza as variações de energia cinética e potencial no balanço de energia.

Bombas. O modelo das bombas baseia-se na equação de conservação da quantidade de movimento angular e nas curvas homólogas do primeiro quadrante.

Linha de Vazão de Surto. A vazão na linha de surto do pressurizador é calculada computando separadamente os termos de expansão e contração do refrigerante do primário em cada componente do sistema de modo a representar os efeitos locais das condições termodinâmicas.

**Modelagem do Sistema de Controle.** O sistema de controle da planta inclui os seguintes modelos:

Movimentação de Barras. Este modelo permite ajustar o posicionamento das barras de controle a fim de manter constante a temperatura média do refrigerante do reator e a potência nuclear compatível com os valores demandados.

Pressão no Pressurizador. Controla a potência dos aquecedores proporcionais e gera sinais liga/desliga para os bancos de aquecedores de retaguarda e gera um sinal abre/fecha para as válvulas de aspersão de água e alívio de pressão.

Nível no Gerador de Vapor. Gera um sinal de posicionamento da válvula de água de alimentação de modo a manter o nível no valor de referência estabelecido. Baseia-se no erro de nível e na diferença entre as vazões de vapor e de água de alimentação.

Pressão do Vapor. Gera um sinal de abertura/fechamento da válvula de desvio de vapor para o condensador, visando manter a pressão na linha de vapor dentro dos valores estabelecidos.

Pressão no Condensador. Gera um sinal para alterar a vazão do sistema de resfriamento do condensador, para manter o valor da pressão dentro da faixa permitida.

Nível de Líquido no Condensador. Regula o nível atuando na válvula na linha de condensado. Tem como entradas o erro de nível e a diferença entre as vazões de entrada e saída do condensador.

É importante ressaltar que, para analisar qualitativamente as respostas do programa, as malhas de controle foram implementadas numa forma bastante simplificada e os seus parâmetros ainda não foram ajustados adequadamente. Portanto, os resultados até então obtidos ainda estão bastante aquém dos esperados.

**Sistema de Proteção do Reator.** O sistema de proteção gera os sinais de desligamento do reator quando os limites operacionais são violados, ou seja, na ocorrência de uma ou mais das seguintes condições:

- nível baixo no pressurizador
- nível alto no pressurizador
- nível baixo no gerador de vapor
- nível alto no gerador de vapor
- pressão baixa no gerador de vapor
- sobrepotência nuclear
- pressão alta no circuito primário
- pressão baixa no circuito primário

## RESULTADOS

Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos da simulação da planta esquematizada no diagrama da Fig. 1, utilizando a configuração do modelo do reator

com 1 nó radial, 5 nós axiais, 6 grupos para precursores e 6 grupos para a geração de calor de decaimento.

Foram simulados 2 transientes: um de aumento e outro de decréscimo na demanda de vapor na turbina, sendo ambos na forma de rampa de 15% por minuto.

Durante a realização dos transientes, o sistema de controle atua automaticamente nas variáveis controladas.

Todos os valores das variáveis apresentadas, exceto a reatividade apresentada em pcm e a posição das barras de controle, mostrada em porcentagem de inserção, estão normalizados.

As Fig. 2 a 5 mostram o comportamento dinâmico de algumas variáveis durante o transiente de aumento na demanda de vapor na turbina.

Observa-se, na Fig. 2 que o valor da potência aumenta gradativamente durante o transiente, estabilizando a partir de 350 segundos de simulação, quando o transiente praticamente se completou.

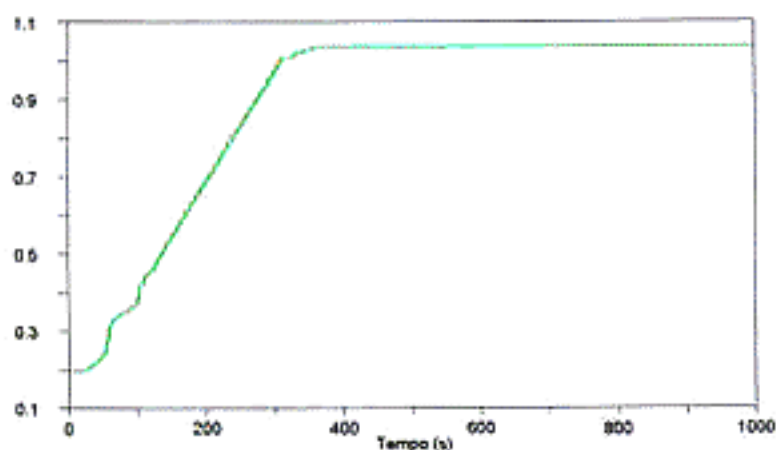


Figura 2. Potência do Reator.

Na Fig. 3 observa-se que a temperatura média estabiliza num valor abaixo do valor inicial, que é o valor de referência, pelo fato de o controlador não estar com seus parâmetros devidamente ajustados.

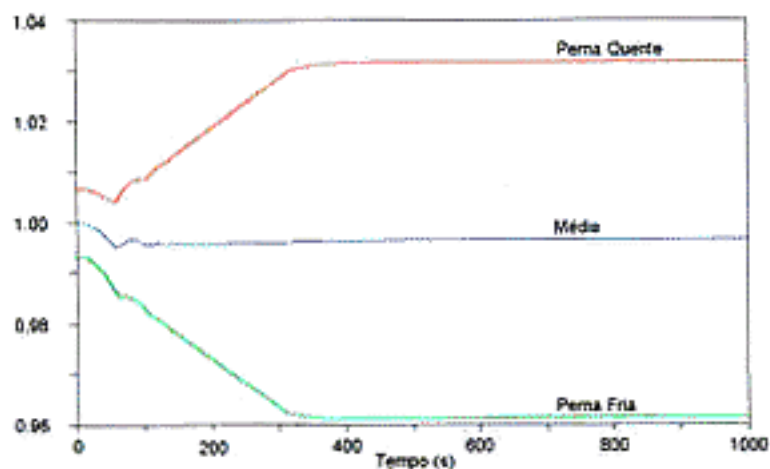


Figura 3. Temperaturas no Refrigerante do Primário.

Conforme mostra a Fig. 4, o valor da pressão no pressurizador apresenta uma ligeira queda, retornando, ao final do transiente, ao valor de referência pela ação do controlador de pressão. As instabilidades observadas entre

50 e 300 segundos decorrem dos efeitos da atuação dos aquecedores.

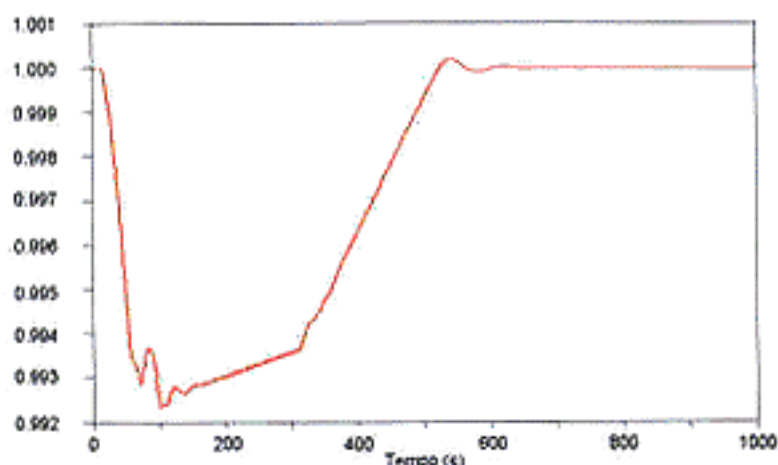


Figura 4. Pressão no Pressurizador.

A Fig. 5 mostra que a pressão no gerador de vapor estabiliza-se rapidamente ao final do evento iniciador do transiente.

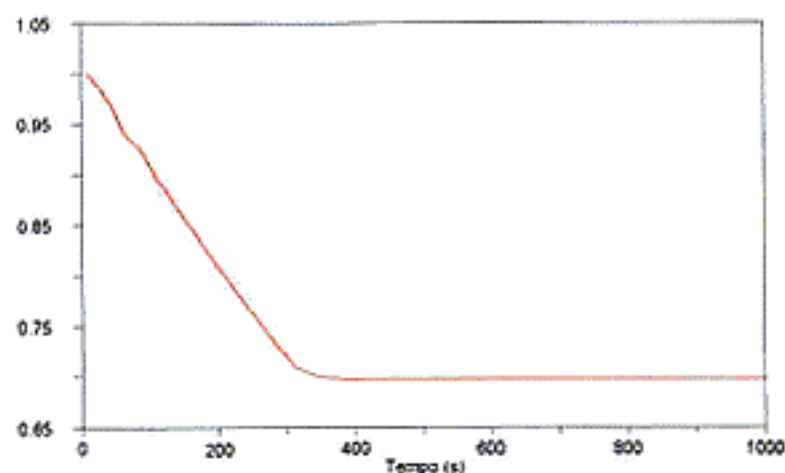


Figura 5. Pressão no Gerador de Vapor.

As Fig. 6 a 9 mostram o comportamento dinâmico de algumas variáveis durante o transiente de redução na demanda de vapor na turbina

Conforme observado na Fig. 6, a potência do reator decresce durante o tempo de ocorrência do transiente, estabilizando após cerca de 400 segundos de simulação.

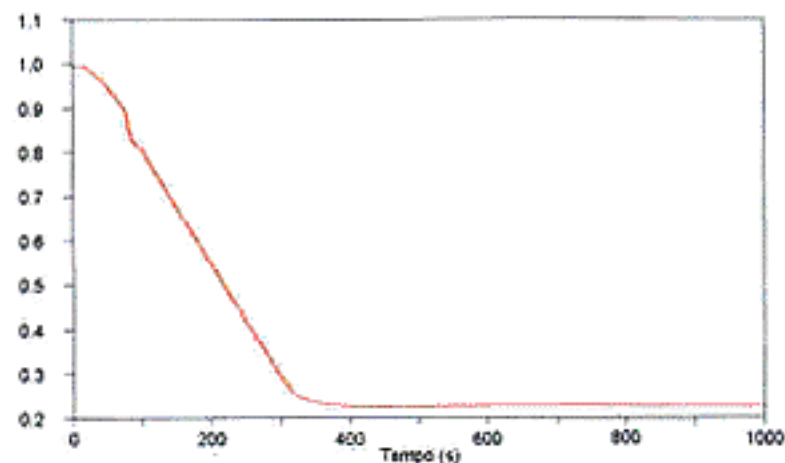


Figura 6. Potência do Reator.

Na Fig. 7 observa-se que a temperatura média do refrigerante do primário estabiliza no valor de referência, após cerca de 500 segundos de simulação, mostrando que o controlador respondeu adequadamente a este transiente.

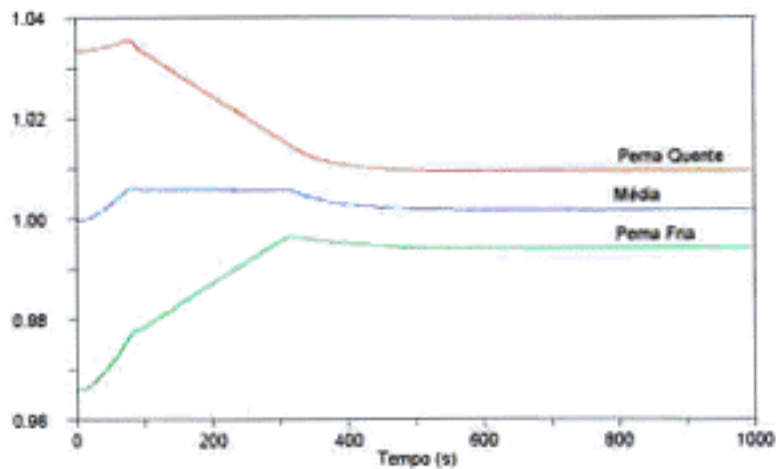


Figura 7. Temperaturas no Refrigerante do Primário.

A Fig. 8 mostra que a pressão no pressurizador apresenta um pico em cerca de 100 segundos após o início do transiente, estabilizando no valor de referência, após 500 segundos de simulação.

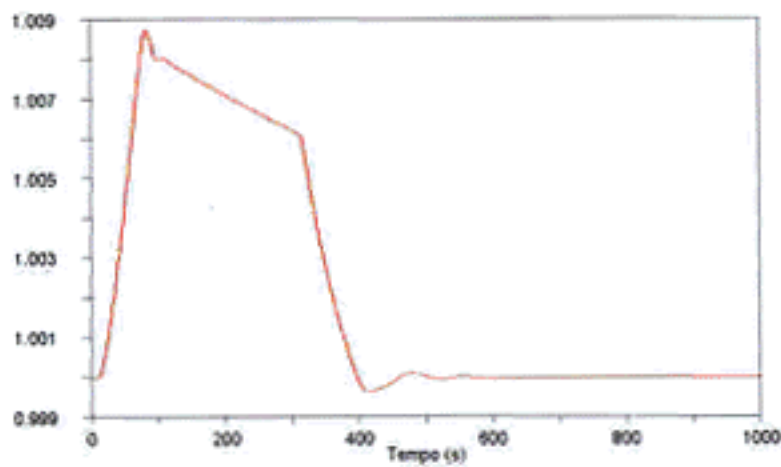


Figura 8. Pressão no Pressurizador.

A Fig. 9 mostra que a pressão no gerador de vapor aumenta rapidamente durante o transiente, atingindo a estabilização após 400 segundos de simulação.

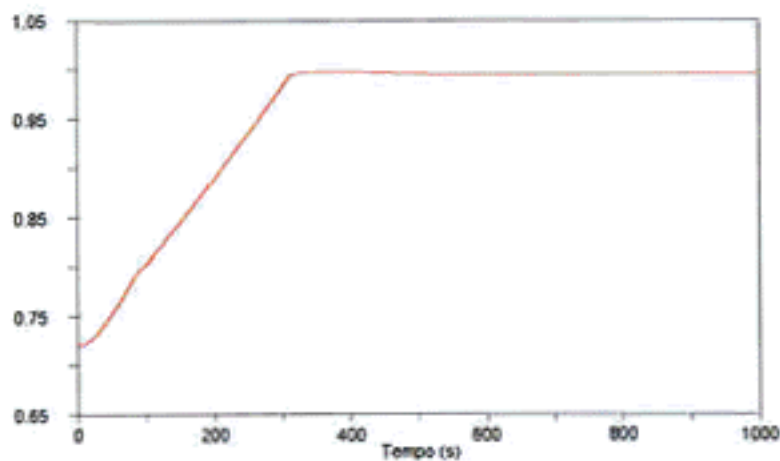


Figura 9. Pressão no Gerador de Vapor.

Com a finalidade de promover uma comparação da dinâmica da planta frente à configuração do modelo do reator, apresentam-se nas Fig. 10 a 14, os resultados da simulação do transiente de aumento na demanda de vapor na turbina, com atuação do sistema de controle, para os seguintes casos:

- a) 1 nó radial, 2 nós axiais, 1 grupo de precursores e 6 grupos para a geração de calor de decaimento;
- b) 1 nó radial, 5 nós axiais, 6 grupos de precursores e 6 grupos para a geração de calor de decaimento;
- c) 8 nós radiais, 5 nós axiais, 6 grupos de precursores e 6 grupos para a geração de calor de decaimento.

Na Fig. 10, observa-se que, nos casos (b) e (c) o comportamento temporal da potência é coincidente enquanto que, para o caso (a) o comportamento é qualitativamente semelhante aos outros dois, discordando durante o tempo de aumento da potência, por efeito do controlador de posicionamento das barras de controle e pelo fato de o núcleo do reator ser representado por apenas dois nós axiais, o que torna o mesmo mais sensível às variações de reatividade.

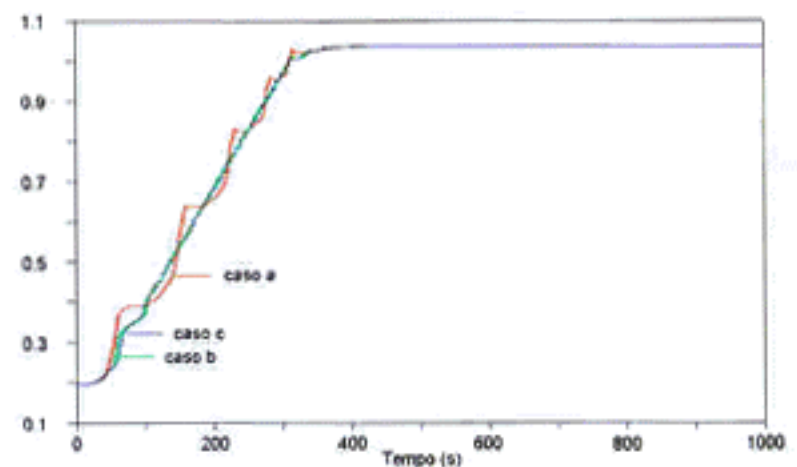


Figura 10. Potência do Reator.

Nota-se, na Fig. 11 que no caso (a) as barras de controle são retiradas durante um tempo maior que nos outros dois casos, inserido, portanto mais reatividade e, conseqüentemente, provocando o desvio observado na curva de potência mostrada na Fig. 10.

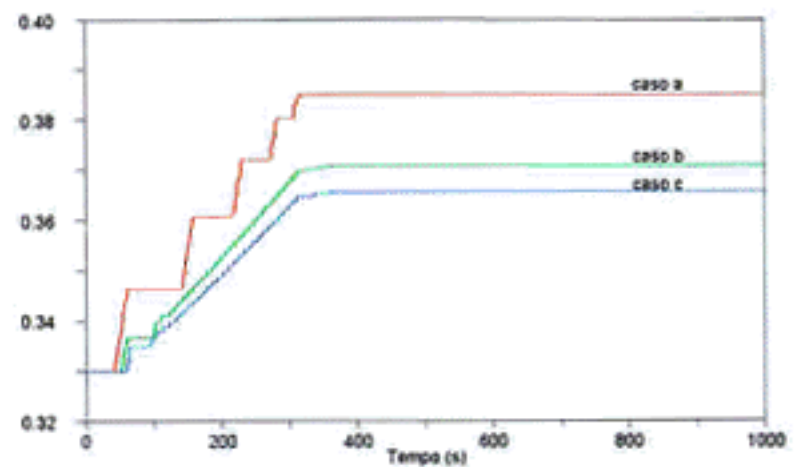


Figura 11. Posição das Barras Controle (% de inserção).

Observa-se, pelo resultado mostrado na Fig. 12 que no caso (a) ocorre uma maior inserção de reatividade positiva, causada pelo fato de ter ocorrido uma maior excursão das barras de controle.

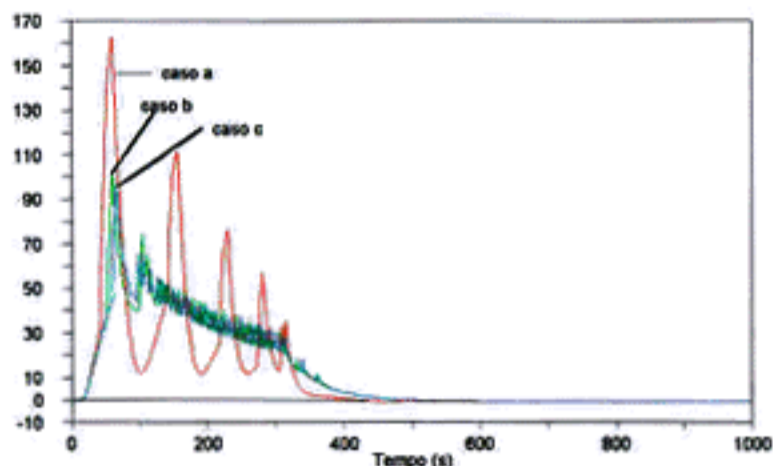


Figura 12. Reatividade Total (pcm).

A Fig. 13 mostra que, no primeiro caso, a temperatura do refrigerante na perna quente atinge valores superiores aos dos outros dois casos, como consequência do maior aquecimento dentro do reator.

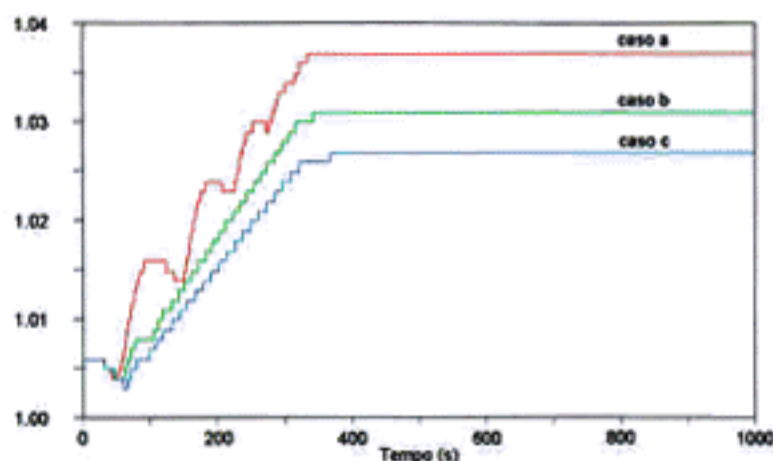


Figura 13. Temperatura na Perna Quente.

A Fig. 14 mostra uma boa aproximação dos valores da pressão para os casos (b) e (c), mas uma ligeira discordância com relação ao primeiro caso, como consequência das diferenças de temperatura no primário.

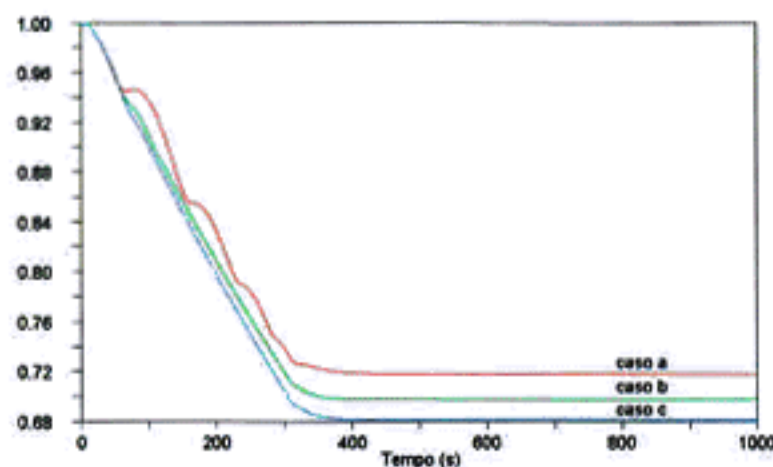


Figura 14. Pressão no Gerador de Vapor.

## CONCLUSÕES

O comportamento temporal das variáveis não sofre influência significativa da configuração do modelo do reator quando se comparam os resultados obtidos para os casos (b) e (c), apresentando uma diferença máxima de aproximadamente 2,8% nos valores de regime permanente. Quando se compara o caso (a) com os demais, nota-se uma discrepância máxima de aproximadamente 5,4%, observada na pressão no gerador de vapor (vide Fig. 11), sendo inferior a este valor para as demais variáveis.

Tendo em vista a coerência dos resultados obtidos e o fato de o tempo de execução do programa SIMPCO ser aproximadamente 5 vezes mais lento que o tempo real quando processado em microcomputador com processador Intel 486 DX4/100 Mhz, concluímos que ele é apropriado para o estudo de estratégia de controle de plantas nucleares. No entanto, recomenda-se um estudo de otimização e validação de seus modelos para melhorar a sua eficiência e garantir a sua confiabilidade.

Devemos observar, também, que as malhas de controle implementadas devem ser melhor detalhadas e seus parâmetros ajustados para atender às condições operacionais da instalação a que se propõe simular.

## REFERÊNCIAS

- [1] TONG, L. S., **Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow**, John Wiley & Sons, N. Y., 1985.
- [2] BARON, R. C., **Digital Model Simulation of a Nuclear Pressurizer**, Nuclear Sci. Eng., vol 52(1), p 283-291, 1973.
- [3] REDFIELD, J. A. and MARGOLIS, S. G., **TOPS - A Fortran Program for the Transient Thermodynamics of Pressurizers**, WAPD-TM-545, 1965
- [4] CABRAL, E. L. L., **Real-Time Three Dimensional Thermal-Hydraulic Nodel and Non-linear Controller for Large PWR Cores**, Tese de Doutorado, MIT, 1988.
- [5] WILSON, G. B., GREINDA, R. J. and PATTERSON, J. F., **Steam Volume Fraction in a Bubbling Two-Phase Mixture**, Tran. Am. Nucl. Soc., vol 4, p 356, 1961.

## ABSTRACT

SIMPCO is a computational program developed to simulate the primary and secondary loops of a PWR nuclear power plant. It was developed to allow the study of different control strategies for the reactor. Written in Turbo-Pascal, SIMPCO simulates the main components of a nuclear power plant, it runs in any PC-compatible microcomputer and allows to follow the behavior of up to 8 variables selected at the beginning of the simulation. It also allows to save all information in a data file for after processing analysis.