

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO AQUECIMENTO E PARTIDA DE CENTRAIS NUCLEARES PWR

MARCELLO A. FARACO-MEDEIROS, CARLOS A. THOMPSON LEITE

E FERNANDO P. RAMALHO

Promon Engenharia Ltda

Praia do Flamengo, 154 - Flamengo

22207 - Rio de Janeiro - RJ

SUMÁRIO

A elaboração do procedimento de aquecimento e partida de centrais nucleares PWR dentro dos critérios de segurança exige, o concurso de simulações. O dimensionamento de alguns equipamentos, o custo e o tempo são variáveis passíveis de otimização. Um simulador desenvolvido para computador, que permite o controle de todos os equipamentos e variáveis envolvidos na operação é descrito. O procedimento elaborado pela KWU e outro alternativo, ambos para a unidade de ANGRA II, são simulados como exemplo e os resultados apresentados. O código mostrou-se uma ferramenta importante em projeto de centrais nucleares.

I INTRODUÇÃO

A partida de reatores nucleares é normalmente efetuada acima de uma certa temperatura a partir da qual as características de segurança inerente (coeficiente negativo de reatividade) são aceitáveis. Sendo assim, é necessário buscar uma outra fonte de calor para fazer o aquecimento do circuito primário até atingir-se esta temperatura. O calor dissipado pelas bombas de circulação e o calor fornecido pelos aquecedores do pressurizador são utilizados para aquecimento e pressurização do primário até as condições de operação. Durante este processo há uma expansão térmica do fluido do primário que é compensada por uma vazão de descarga. O procedimento envolve ainda descarga de gases do pressurizador e aquecimento do secundário, entre outras etapas. Toda a operação torna-se mais complexa na medida em que existem restrições ao caminho percorrido. Estas restrições visam manter índices de segurança e dizem respeito a níveis de líquido nos vasos, gradientes de pressão e temperatura no tempo e no espaço, grau de subresfriamento do fluido de processo, além da faixa de operação dos equipamentos.

A complexidade do procedimento e os requisitos de segurança nuclear exigem o recurso da simulação. De fato, para uma dada planta com características conhecidas, não se pode afirmar, baseado em cálculos simples, nem mesmo se será possível atingir a temperatura de criticidade utilizando-se as fontes de calor disponíveis. Prever se um dado procedimento violará alguma restrição é virtualmente impossível sem o concurso de uma simulação.

A motivação para a elaboração de um simulador vai além disso. O procedimento como um todo pode ser otimizado em termos de tempo e custo, este último englobando o dimensionamento de alguns equipamentos. Adicionalmente uma ferramenta desta natureza permite o treinamento de pessoal na execução deste procedimento, e possibilita a análise de critérios de segurança, pois os erros na operação podem ser simulados até a falha.

II MODELAGEM

A Fig. 1 mostra os equipamentos e sistemas envolvidos nesta operação. Distinguem-se quatro volumes de controle, a saber: o gerador de vapor (GV), o pressurizador (PZ), o tanque de descarga (TQ) e o circuito primário de resfriamento (PR) que engloba o sistema de purificação de refrigerante [1,2]. Para cada um dos volumes de controle é assumida uma distribuição uniforme das propriedades do fluido de trabalho e portanto adota-se um modelo de parâmetros concentrados. Esta hipótese é válida já que os processos de mistura nos volumes de controle são muito rápidos comparados com os gradientes no tempo das médias espaciais.

A modelagem consiste basicamente das equações de conservação de massa e energia nos volumes de controle. Nos volumes bi-fásicos o tratamento da fase gasosa é feito a partir da hipótese de 100% de umidade relativa [3], desta forma, a pressão parcial de vapor é a pressão de saturação a temperatura do volume de controle. Esta hipótese também é razoável tendo-se em conta a eficiência dos processos de mistura. Neste simulador um tratamento diferenciado foi dado à válvula de sangria do primário. O modelo empregado baseia-se na referência [4]. Na transferência de calor no GV foi adotado um coeficiente de filme constante ao longo de toda a operação [5]. A pequena diferença de temperatura entre o GV e o PR obtida em todas as fases do procedimento qualifica a hipótese de distribuição uniforme das propriedades.

Das hipóteses e simplificações as equações ficam qualitativamente da seguinte forma:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \sum m_i - \sum m_o \quad (1)$$

$$\frac{\partial u \rho V}{\partial t} = \sum m_i h_i - \sum m_o h_o + \sum Q + \sum W \quad (2)$$

Resulta então num sistema com 11 graus de liberdade, incluindo o sistema de purificação. Estes graus de liberdade representam o controle sobre os equipamentos ou sobre as propriedades do fluido de trabalho. O simulador permite o controle das seguintes variáveis:

- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| No primário | No gerador de vapor |
| temperatura | temperatura |
| potência do reator | pressão |
| rotação das bombas | volume de líquido |
| | vazão de alimentação |
| | vazão de purga |
| No pressurizador | No tanque de descarga |
| temperatura | pressão |
| pressão | vazão de descarga de gases |
| potência de líquido | vazão de sangria do PR |
| vazão de descarga de gases | CV percentual da válvula |
| vazão de surto | de sangria |
| vazão de aspersão | |

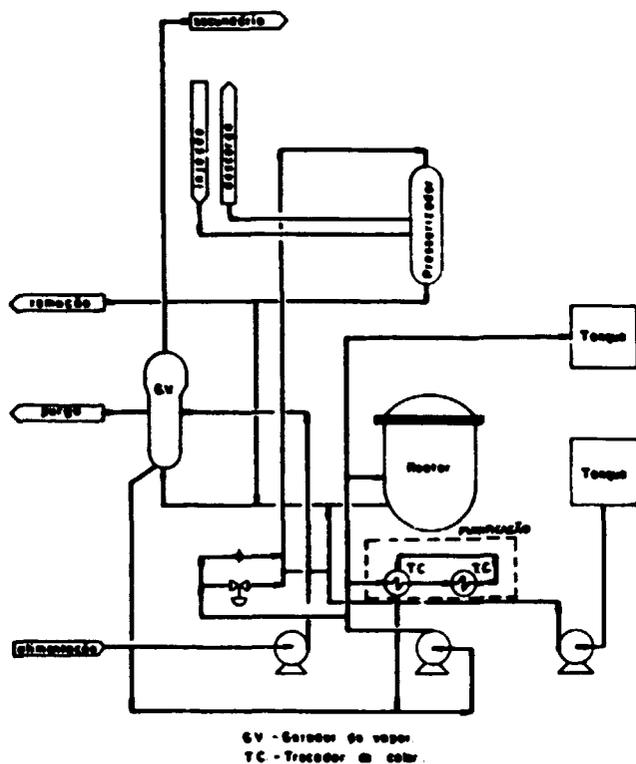


Fig.1 - Circuito Primário, equipamentos e sistemas envolvidos no aquecimento e partida da unidade.

Para cada controle acionado, ou seja modo de operação do equipamento, ou propriedade especificada, resulta uma equação da seguinte forma:

$$\text{variável} - \text{dado} = 0$$

A atuação sobre os graus de liberdade de forma adequada torna o problema bem posto.

O problema é resolvido pelo método das diferenças finitas. Na solução do sistema de equações algébricas não lineares resultante é aplicada o método de Newton-Raphson Multivariáveis [6] em conjunção com a Eliminação de Gauss [7].

Devido aos diferentes períodos de tempo decorridos em cada fase do procedimento, o Δt de integração pode ser alterado em cada passo, e deve ser feito para uma simulação adequada. Uma peculiaridade adicional consiste na integração com o Δt determinado pelo sistema. Neste caso uma condição é especificada ao final do intervalo de integração e o Δt passa a ser uma incógnita. Esta característica é importante para se determinar o final de uma etapa do procedimento.

A simulação para Δt incógnito significa uma grande alteração no modelo do sistema de equações. No entanto não resultou em dificuldades na convergência, aliás, pelo contrário, se mostrou em alguns casos mais estável.

As correlações de propriedades termodinâmicas adotadas foram obtidas na ref.[8], sendo funções de p e T . Devido a isto, as variáveis entalpia e volume específico foram transformadas em funções de p e T para evitar a necessidade de inverter as correlações termodinâmicas.

III ANÁLISE DA ESTABILIDADE DO PROGRAMA

Volume de gás muito pequeno. Nos volumes de controle bifásicos o sistema está sujeito a instabilidades. Isto se deve ao fato de que as estimativas iniciais para a iteração no tempo considera um aumento de temperatura e manutenção do nível de líquido. Um volume de gás muito pequeno pode não ser suficiente para absorver a expansão

térmica verificada na 1ª iteração. As equações perdem assim seu significado físico e o sistema caminha para uma solução não conveniente. Este fato nada mais é do que a expressão numérica de um problema possível em operação que resultaria, por exemplo, da falha fechada da válvula de sangria durante o aquecimento do primário que ocasionaria a ruptura do vaso.

Descarga de gases. O processo vaporização e descarga de gases, quando simultâneo pode ser representado por um volume com uma alimentação e uma descarga. A alimentação é de vapor puro enquanto a descarga consiste numa mistura de vapor e gás. Considerando um processo eficiente de mistura, a variação da massa de N_2 no tempo é um decaimento exponencial:

$$M_{N_2} = \rho_{N_2}^0 V e^{-\frac{v}{V} t} \quad (3)$$

Funções exponenciais são problemáticas em processos de integração numérica pois em geral estes assumem algumas propriedades como constantes ao longo do intervalo e iguais ao valor do início do mesmo o que, neste caso, não é uma boa hipótese.

Na forma como foi estruturado o programa a solução é utilizar intervalo de integração pequeno.

Proximidade do ponto crítico. A condição de operação do pressurizador considerando os requisitos de fluido saturado a alta pressão situa-se próxima ao ponto crítico. Nesta região a variação dos calores específicos é muito grande, tendendo para infinito.

Esta característica gera uma instabilidade no método. O sistema oscila em torno da solução com amplitude crescente. Esta característica obriga à que o processo de integração seja feito a intervalos pequenos. O que ocorre de fato é que, diante das grandes variações de operação, as estimativas iniciais ficam inadequadas. Nestas condições o sistema fica mais robusto se for utilizada a opção de Δt determinado pelo programa a partir de uma temperatura no PZ especificada ao final do intervalo de integração. Tendo uma temperatura especificada, o algoritmo consegue boas estimativas iniciais de propriedades para a integração no tempo.

Este problema na verdade não é exclusivo da região vizinha ao ponto crítico. Este sinaliza o fato de que o sistema é sensível a estimativas iniciais para intervalos de integração relativamente grande, como ocorre em outras fases do procedimento, e torna-se grave a medida que as derivadas das propriedades com relação à temperatura aumentam. No entanto o sistema é consideravelmente mais estável se um intervalo de temperatura for utilizado ao invés do intervalo de tempo.

Instabilidade na temperatura do gerador de vapor. A modelagem do calor transmitido do primário para o GV é feito considerando o ΔT entre primário e GV médio do intervalo de integração. Esta modelagem não permite a simulação adequada de uma variação brusca no calor transmitido.

Num aumento do calor transmitido, por exemplo, o sistema buscará um novo ΔT médio maior que o inicial e obterá um ΔT final maior que o médio. No intervalo seguinte, para manter o novo ΔT médio, calculará um ΔT final menor e assim por diante. Variações bruscas no calor podem resultar numa oscilação na temperatura do GV. Este problema é característico do início da fase de aquecimento nuclear que resulta num aumento significativo no gradiente da temperatura do primário em relação ao tempo. No entanto a potência do reator não atinge instantaneamente o valor de regime e se a simulação for feita em intervalos pequenos retratando o aumento de potência o GV irá paulatinamente se acomodando ao novo ΔT de regime.

IV A PARTIDA DE ANGRA II

Para ilustrar a utilização do código foram simulados dois procedimentos de partida para o reator nuclear de Angra II, Fig.2 e 3. O primeiro é o procedimento proposto pela KWU [9]. O segundo foi elaborado no âmbito deste trabalho e visa principalmente demonstrar a versatilidade e o potencial do simulador.

No procedimento da KWU nota-se que as tarefas são realizadas em geral uma de cada vez. Desta forma o aquecimento do pressurizador não ocorre simultaneamente ao aquecimento do primário, exceto na etapa de diluição. O procedimento proposto realiza as tarefas simultaneamente. Mostra bem a utilidade do simulador pois as etapas não são bem definidas e é difícil prever qual tarefa se encerrará primeiro e como serão as condições no início da tarefa seguinte. Com este procedimento é possível reduzir sensivelmente o tempo de partida da unidade.

O primeiro procedimento realiza o teste de estanqueidade tão logo seja atingida a temperatura de transição dúctil/frágil do material da contenção. Este teste deve ser realizado sempre que houver abertura do circuito primário, por exemplo, para troca de combustível. A pressurização para o teste é feita através da injeção de nitrogênio. O procedimento alternativo mostra como poderia ser realizado o teste de estanqueidade na ausência deste sistema de injeção, através da pressurização via aquecimento da pressurizador. Além disso foi adotado para sangria do primário uma válvula de controle com CV=10.

Durante o procedimento foi utilizada uma faixa de 5 a 100% do CV, o que poderia viabilizar a utilização de apenas uma estação redutora de pressão ao invés de duas, uma de alta e outra de baixa, empregadas no procedimento 1.

V VALIDAÇÃO E VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS

Foram realizados testes de estabilidade numérica que consistiram na simulação dos sistemas sem o funcionamento de fontes ou sumidouros de massa e energia. As variáveis simuladas mantiveram-se inalteradas durante uma centena de intervalos de simulação de 1 segundo, 1 minuto e 1 horas. Outro teste consistiu na simulação dos volumes de controle separadamente. Os resultados foram comparados a cálculos manuais com excelente concordância.

A comparação com dados experimentais é difícil devido a não disponibilidade de plantas que permitam o monitoramento de todas as variáveis simuladas. Alguns testes foram realizados e a comparação feita através das variáveis disponíveis mostrando resultados aceitáveis, no entanto estes testes têm caráter confidencial.

VI CONCLUSÃO

O programa atendeu aos propósitos iniciais de versatilidade. Permite a simulação da partida e aquecimento e eventualmente de

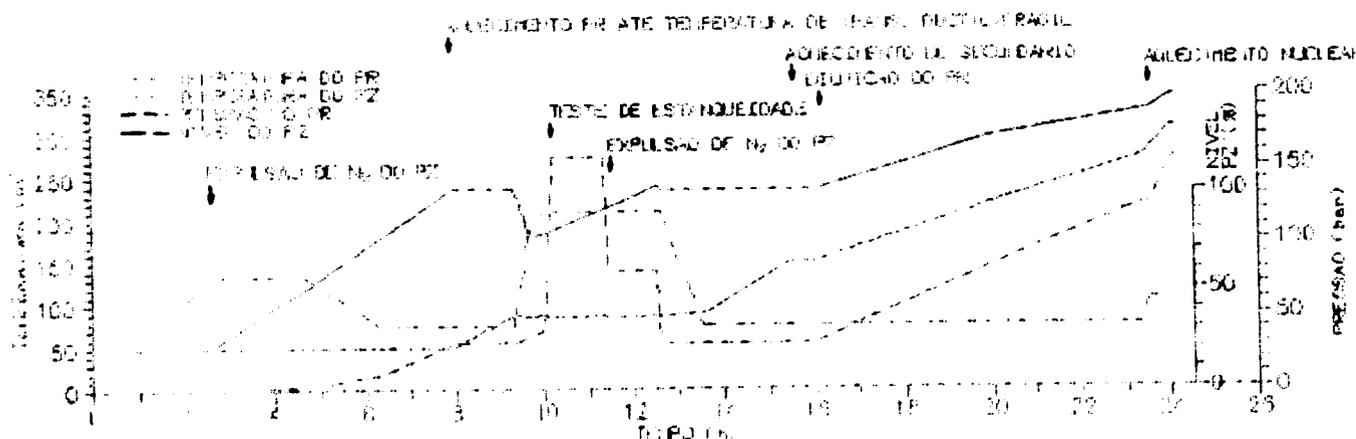


Fig.2 - Procedimento de partida da unidade de Angra II proposto pela KWU

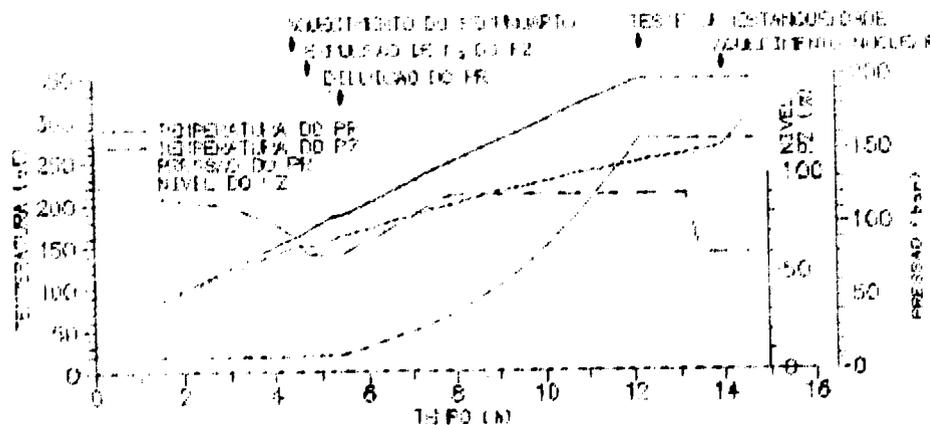


Fig.3 - Procedimento de partida alternativo da unidade de Angra II

outros modos de operação. Pode também ser adaptado para simulação do procedimento de partida e resfriamento. O tempo de simulação depende da precisão requerida e do próprio procedimento. Em geral a convergência se dá em 5 ou 6 iterações. A utilização deste programa permite a elaboração de procedimentos alternativos de partida e pode ser usado na otimização e redução de custos em projetos nucleares.

Agradecimentos. Os autores agradecem aos eng^{os} Carlos Gonzales Lôbo e João Luis Carvalho Pires que gentilmente forneceram as informações sobre a unidade de Angra II que permitiram as simulações apresentadas como exemplo e ao Dr Ksavan Nair pelas frutuosas discussões que sobremancira concorreram para a qualidade deste trabalho. A PROMON Engenharia Ltda forneceu o suporte necessário.

REFERÊNCIAS

- [1] Rust, J. H., "Nuclear Power Plant Engineering", Harolson Publishing Company, 1979.
- [2] Silva-Neto, A. J. e Maciel F^o, L. A., "RESFRIA - Uma rotina Computacional para Análise Termo-Hidráulica do Resfriamento de Centrais Nucleares PWR". X Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, pp. 537-540. 1989.
- [3] Adkins, C. J., "Equilibrium Thermodynamics", McGraw Hill, 1984.
- [4] Valtek, "Control Valves".
- [5] Tong, L. S. and Weisman, J., "Thermal Analysis of Pressurized Water Reactor".
- [6] [10] Camahan, B. et al., "Applied Numerical Methods". John Wiley and Sons Inc., 1969.
- [7] Conte, S. D. and Boor, C., "Elementary Numerical Analysis". McGraw Hill, 1981.
- [8] Ernest Schmidt "Wasserdampfmaschinen". VDI - Springer Verlag, 1963.
- [9] KWU, documentos técnicos do projeto básico das unidades de Angra II e III.

ABSTRACT

The start up of PWR nuclear power plant involves a lot of equipments. The procedure must be done within safety criteria and requires a simulation. The design of some equipments, costs and time can be optimized. A computer simulator, which allows control of all of the equipments and variables taking part in operation, has been developed and is presented in this papers. The KWU procedure and an alternative one both to Angra II were simulated and the results are presented. The code is an important tool in nuclear power plant projects.