

MODELO MATEMÁTICO PARA O ESTUDO DO COMPORTAMENTO  
DINÂMICO DE GERADORES DE VAPOR VERTICAIS DE TUBOS EM  
U COM CIRCULAÇÃO NATURAL

EDUARDO LOBO LUSTOSA CABRAL  
ARTUR JOSÉ GONÇALVES FAYA

DIVISÃO DE TERMODINÂMICA E TERMO-HIDRÁULICA  
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
SÃO PAULO-SP

SUMÁRIO

Neste trabalho apresenta-se as principais características de um modelo matemático e resultados de um estudo do comportamento dinâmico de um gerador de vapor vertical de tubos em U com circulação natural, presente na maior parte dos reatores tipo PWR. O modelo inclui balanço de massa, de energia, de quantidade de movimento e cálculo dos coeficientes de transferência de calor. Inicialmente é calculado o estado estacionário para qualquer nível de potência, em seguida, analisa-se o transiente causado por uma perturbação de interesse. A verificação do modelo é realizada através de comparação com resultados experimentais de testes dinâmicos.

## 1. Introdução

A análise dinâmica é um fator essencial para o projeto de componentes centrais nucleares. A simulação dos sistemas fornece informações necessárias para avaliar capacidade de manobras, estratégias de controle e tolerâncias a mal funcionamentos. O gerador de vapor é um componente essencial em qualquer instalação de potência, servindo, no caso dos reatores tipo PWR, como um acoplamento térmico entre o circuito primário e o circuito secundário, ocupando assim uma posição estratégica. O estudo de seu comportamento dinâmico, em razão da posição que ocupa é de considerável interesse para a análise de segurança e para assegurar uma operação confiável da instalação.

Foi desenvolvido um modelo matemático para estudar o comportamento dinâmico de geradores de vapor verticais de tubos em U com circulação natural, presente na maioria dos reatores PWR, utilizando-se a técnica de divisão do sistema em volumes de controle. Note-se que na literatura existem diversos estudos sobre o assunto, sendo que os modelos existentes vão desde modelos complexos que utilizam a técnica de diferenças finitas, até modelos simples com um único volume de controle. Os modelos que utilizam a abordagem de volumes de controle são, em geral muito simples, incapazes de descrever adequadamente os processos físicos que ocorrem neste tipo de gerador e conseqüentemente prestam-se somente ao estudo de pequenos transientes.

A medida que se deseja estudar o maior número possível de transientes, sejam operacionais ou acidentais, é necessário que o modelo apresente uma razoável descrição dos processos físicos; para isso, dividiu-se o gerador de vapor em 16 volumes de controle. Aplicam-se as leis de conservação de energia, massa e quantidade de movimento, incluindo cálculo dos coeficientes de transferência de calor, cálculo do nível de água e cálculo de perda de pressão.

A verificação do modelo é realizada pela comparação com testes experimentais realizados durante o comissionamento da usina nuclear K B C unidade 1 de 450 M w de potência elétrica localizada na Holanda.

Finalmente, note-se que o modelo desenvolvido, mesmo descrevendo detalhadamente os processos termo-hidráulicos, é razoavelmen

te simples. Comparando-o com os modelos que utilizam a técnica de diferenças finitas exige um pequeno tempo de computação, sem contudo, perder a precisão.

## 2. Descrição do Sistema Físico

Um esquema de um gerador de vapor vertical de tubos em U é apresentado na figura 1. Os diferentes processos encontrados na operação normal deste gerador são:

### A. Lado do circuito primário:

O fluxo primário proveniente da perna quente do reator entra na câmara inferior do gerador de vapor através do bocal de entrada. Escoa pelo interior dos tubos em U, transferindo calor para o fluxo do circuito secundário que entra na câmara inferior de saída antes de deixar o gerador. Note-se que o fluxo do fluido primário é paralelo ao fluxo do secundário quando da sua subida pelo interior dos tubos e em contra-corrente quando da descida. Assim, o gerador de vapor de tubos em U pode ser considerado composto de um gerador de fluxo paralelo e um de fluxo em contra-corrente.

### B. Tubos de metal:

As paredes dos tubos de metal separam o fluido do primário do fluido do secundário. A condutância do metal juntamente com os coeficientes de película interno e externo aos tubos, determinam os coeficientes globais de transferência de calor relacionados com as temperaturas médias dos fluidos e do metal.

### C. Lado do circuito secundário:

A água de alimentação do circuito secundário entra no pleno superior através de um anel, onde se mistura com água saturada separada do vapor pelos separadores. Esta água ligeiramente subresfriada, desce pelo "downcomer" (região anular entre os tubos e a carcaça) e entra na região dos tubos. O calor proveniente do circuito primário é transferido para o fluido à medida que este sobe, escoando por fora dos tubos, formando uma mistura água - vapor. A

mistura bifásica abandona a região dos tubos passando através dos separadores de vapor, onde o vapor é separado e coletado na parte superior do gerador, enquanto a água é misturada com a água de alimentação. O vapor sai do gerador, por um bocal na sua parte superior, a uma taxa determinada pela carga-elétrica.

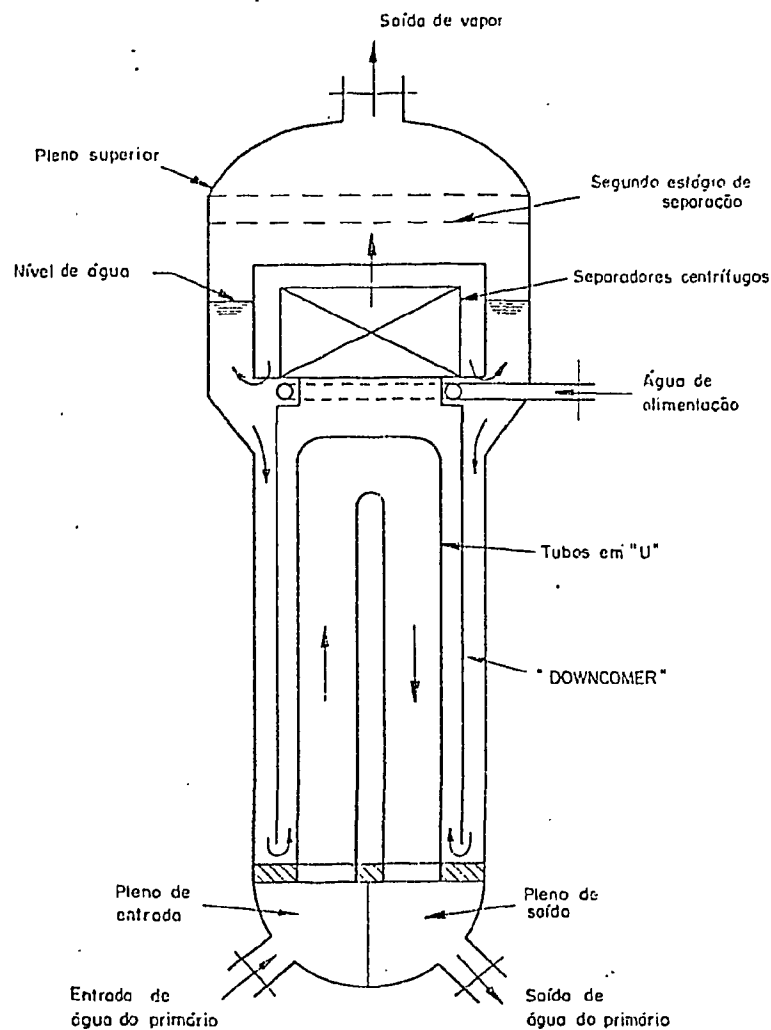


Figura 1: Esquema do gerador de vapor vertical de tubos em "U" com circulação natural

### 3. Modelo Matemático

A técnica utilizada no desenvolvimento do modelo matemático consiste em dividir o gerador de vapor em volumes (blocos), de modo que em cada volume as propriedades do fluido, ou materiais, não variem muito entre a entrada e a saída.

No modelo alguns volumes terão comprimentos variáveis determinados por uma fronteira móvel que separa regiões com processos significativamente diferentes. Existem duas fronteiras móveis: uma localizada na região dos tubos no ponto onde o fluido secundário atinge a temperatura de saturação, ou seja, separa a região subresfriada da região saturada; a outra, localizada no pleno superior, representa o nível de água no gerador de vapor.

No desenvolvimento de um modelo matemático para um sistema complexo como este gerador de vapor, várias hipóteses são feitas:

- . escoamento unidimensional tanto para o fluido primário quanto para o fluido secundário;
- . condutividade térmica, calor específico e densidade constantes para o metal;
- . a entalpia e o título da mistura bifásica, na região de ebulição do circuito secundário, variam livremente com a posição;
- . modelo homogêneo para a mistura bifásica água-vapor;
- . despreza-se os processos de ebulição subresfriada;
- . despreza-se os processos naturais de condensação e evaporação na superfície do líquido no pleno superior;
- . não há transferência de calor entre a região dos tubos e o "downcomer";
- . não há transferência de calor entre os plenos de entrada e de saída do fluido primário;
- . não há perda de calor para o ambiente;
- . despreza-se perdas de pressão por aceleração.

A repartição do gerador de vapor em volumes de controle, está esquematizada na figura 2, onde se distingue:

A. Lado do Circuito primário:

- . pleno de entrada - PRE

- . bloco 1 do primário - PRL1
- . bloco 2 do primário - PRL2
- . bloco 3 do primário - PRL3
- . bloco 4 do primário - PRL4
- . pleno de saída - PRS

B. Tubos de metal:

- . bloco de metal 1 - MTL1
- . bloco de metal 2 - MTL2

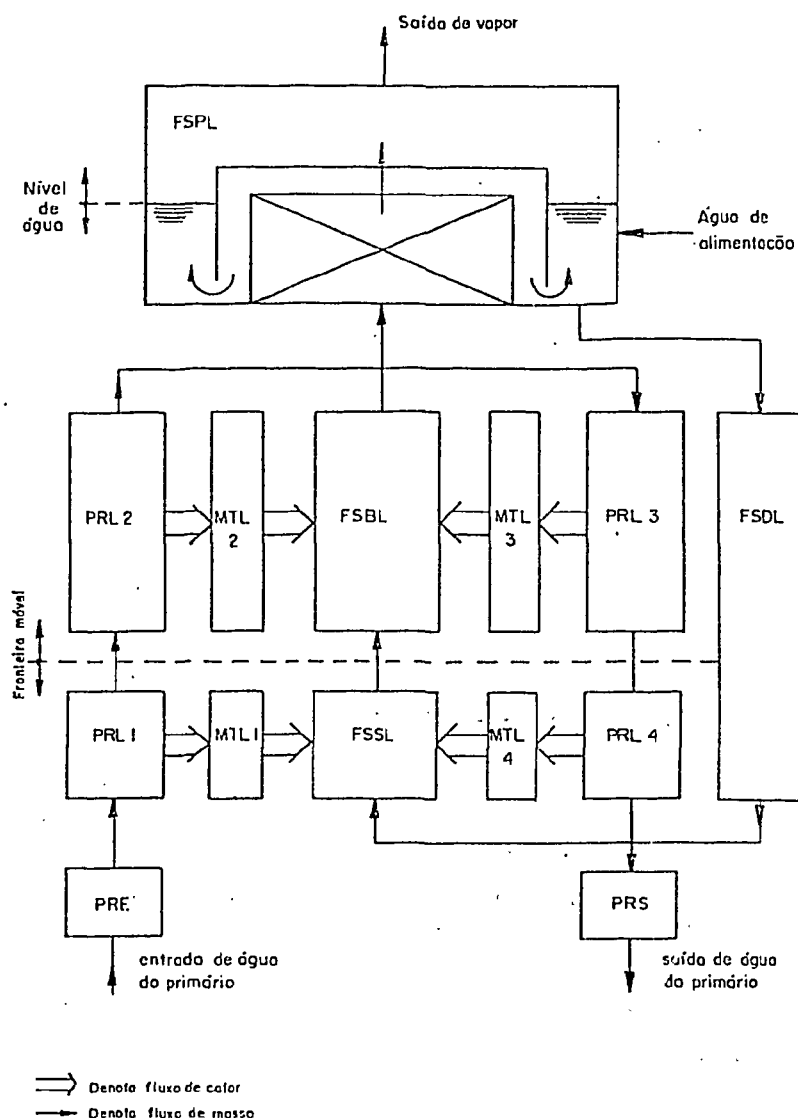


Figura 2: Esquema da repartição do gerador de vapor em volumes de controle

- . bloco de metal 3 - MTL3
- . bloco de metal 4 - MTL4

C. Lado do circuito secundário:

- . bloco subresfriado - FSSL
- . bloco bifásico - FSBL
- . pleno superior - FSPL
- separador
- volume de água
- volume de vapor
- . "downcomer" - FSDL

A fronteira móvel entre o bloco FSSL e o bloco FSBL é calculada na simulação. O comprimento dos blocos adjacentes de metal e do circuito primário, acompanha a variação do comprimento dos blocos do secundário. Este tipo de formulação considerando uma fronteira distinta entre as regiões subresfriadas e saturada, não leva em consideração os detalhes dos processos que envolvem ebulição subresfriada e variações nos mecanismos de geração do vapor. Admite-se que esses processos tenham pequeno efeito no comportamento macroscópico do sistema.

O modelo inclui: balanço de energia para os fluídos primário, secundário e para tubos de metal, balanço de massa para os fluidos primário e secundário, balanço de quantidade de movimento para o fluido secundário e cálculo dos coeficientes de transferência de calor e de perda de carga. Uma descrição sucinta da equação de quantidade de movimento permite avaliar precisamente o nível de água no gerador de vapor durante os transientes.

São considerados os seguintes itens na equação de quantidade de movimento:

- . perda de pressão devido ao atrito no "downcomer";
- . perdas de pressão singulares presentes no "downcomer";
- . armazenamento de quantidade de movimento no "downcomer";
- . perda de pressão por atrito paralelo ao feixe de tubos na região subresfriada;
- . perda de pressão por atrito da mistura bifásica escoando paralelamente ao feixe de tubos;

- . perda de pressão nos separadores;

Desta forma algumas formas de perda de pressão não são consideradas explicitamente, como por exemplo: perdas nas grades espaçadoras dos tubos e perdas por atrito devido ao fluxo cruzado na curvatura dos tubos em U. Estas perdas são consideradas indiretamente como sendo perdas singulares localizadas no "downcomer", não sendo calculadas diretamente porque exigiram um conhecimento detalhado do gerador de vapor, que não é sempre disponível.

No lado do circuito primário o calor é transferido pela água subresfriada fluindo no interior dos tubos com altos números de Reynolds, admitindo-se assim o uso da correlação de Dittus-Boelter <sup>(7)</sup> para o cálculo do coeficiente de transferência de calor entre o fluido e a superfície interna dos tubos. No lado do circuito secundário de geradores de vapor com circulação natural, o título máximo da mistura água-vapor na saída da região de transferência de calor é cerca de 0,3, portanto somente dois regimes de transferência de calor são de interesse: convecção forçada e ebulição nucleada. Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor entre a região subresfriada do secundário e a superfície dos tubos adota-se novamente a correlação de Dittus-Boelter. Para a região de ebulição nucleada foram selecionadas as correlações de Chen <sup>(7)</sup> de Thon <sup>(7)</sup>, havendo a possibilidade de escolha.

A medida que o principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento do modelo do gerador de vapor; os seguintes parâmetros são considerados como condições de contorno:

- . temperatura da água de entrada do primário;
- . temperatura da água de alimentação;
- . vazão de água no circuito primário;
- . vazão da água de alimentação do secundário;
- . coeficiente da válvula de vapor ou a vazão de saída do vapor;

Note-se que todas estas grandezas dependem de mecanismos externos ao gerador de vapor.

#### 4. Análise Numérica

As equações mencionadas no capítulo anterior aplicadas aos 16 volumes de controle resultam num sistema misto de equações dife-

renciais ordinárias e equações algébricas, todas não lineares. Além destas equações e das condições de contorno, são necessárias as equações de estado para se obter as propriedades físicas e termodinâmicas da água em função das condições de temperatura e pressão.

Devido à grande complexidade do sistema de equações, que deve ser resolvido juntamente com o cálculo das propriedades, cálculo das condições de contorno e cálculo dos coeficientes de transferência de calor e de perda de pressão, é dado um tratamento especial à resolução numérica destas equações.

A solução das equações é feita em dois passos. O primeiro é a obtenção do estado estacionário necessário para iniciar o transiente, e o segundo é a resolução das equações para o prosseguimento do transiente causado por alguma perturbação de interesse. Para o cálculo da condição inicial basta fazer as derivadas em relação ao tempo iguais à zero, obtendo-se desta forma um sistema de equações algébricas não lineares. É utilizado o método de Newton-Raphson para a resolução deste sistema de equações não lineares.

No cálculo do transiente deve ser resolvido simultaneamente um sistema de equações algébricas e um sistema de equações diferenciais que estão interrelacionados. Para o cálculo do sistema algébrico utiliza-se o método iterativo de Gauss-Siedel aplicado às equações não lineares. Na integração do sistema de equações diferenciais existem duas opções, escolhidas de acordo com o transiente a ser estudado:

- . Método de Runge-Kutta de 4º ordem;
- . Método predictor corretor de Hamming inicializado pelo método de Runge-Kutta de 4º ordem;

Como dado de entrada para o modelo é necessário somente a geometria do gerador de vapor e condições nominais de operação, como : pressão de saturação, temperatura de entrada dos fluidos primário e secundário, vazões do primário e da água de alimentação e potência térmica.

## 5. Resultados e Comparações

Foram simulados um certo número de transientes, utilizando o modelo desenvolvido, com a finalidade de investigar a influência de diferentes perturbações nas condições de contorno, bem como a valida

das hipóteses adotadas.

A verificação do modelo desenvolvido foi realizada pela comparação de seus resultados com resultados de testes experimentais realizados durante o comissionamento da usina nuclear KBC unidade I, tipo PWR, de 450 Mw de potência elétrica, localizada na Holanda<sup>(5)</sup>. Limitações na instrumentação do gerador de vapor e na precisão dos dados experimentais, disponíveis somente na forma de gráficos, excluem uma verificação perfeita, somente as formas e tendências das curvas podem ser comparadas.

Foi selecionado para apresentação, um transiente que se constitui em uma redução de potência de 100% para 25% da carga nominal. São usados como condição de contorno, para o modelo, a temperatura de entrada do fluido primário, a vazão mássica do fluido primário, a temperatura da água de alimentação, a vazão da água de alimentação e a vazão de saída de vapor; todos esses valores são dados experimentais. Observa-se que tanto a vazão do fluido primário, quanto a temperatura da água de alimentação permanecem constantes durante o transiente. A pressão no pleno superior ou pressão de saturação do secundário, e o nível de água no gerador se constituem nos valores de saída utilizados para a verificação do modelo, através de comparação com os respectivos dados experimentais. Note-se que não existia um valor experimental para a temperatura de entrada do fluido primário no gerador; este problema foi resolvido pela obtenção desta temperatura a partir dos dados experimentais da potência do reator e da temperatura média do refrigerante no reator.

Este transiente é caracterizado por uma rápida redução na potência térmica do reator de 100% para 55%, seguida por um pequeno aumento para 70%, devido a ação dos sistemas de controle. Após este ligeiro aumento, a potência é novamente reduzida atingindo 42% e, posteriormente, o reator é desligado. Paralelamente a estas ações as válvulas de vapor são fechadas e as válvulas de desvio para o condensador são abertas. A vazão de água de alimentação é reduzida por ações do sistema de controle do nível de água.

As condições de contorno, os resultados experimentais e os resultados da simulação estão apresentados nas figuras de número 3 a até 3f. Estão incluídos nestas figuras os resultados obtidos na simulação deste transiente pelo modelo desenvolvido por Bruens<sup>(5)</sup>. Observa-se que nas figuras 3b e 3c, a temperatura de saída do primário

rio e a pressão de saturação calculadas pelo modelo de Bruens não estão presentes; isto se deve ao fato de que estas respostas são praticamente idênticas às do modelo descrito neste trabalho, sendo portanto, desnecessário a sua repetição.

Os resultados mostram que a pressão do secundário é prevista muito bem pelo modelo, exceto durante os primeiros segundos do transiente. Esta falha pode ser atribuída à utilização de condições de contorno incorretas decorrentes da imprecisão dos dados experimentais. Uma boa indicação deste fato é a resposta do modelo de Bruens seguir o mesmo resultado do presente modelo. Os desvios subsequentes do valor experimental estão dentro de uma margem de 4% de erro.

A resposta do nível de água mostra uma concordância excelente com as medidas do detetor de pequeno intervalo durante os segundos iniciais do transiente. No restante do transiente a resposta da simulação permanece dentro de um intervalo compreendido entre as medidas dos detetores de pequeno e de grande intervalo, seguindo a mesma tendência.

#### Observações:

Segundo Bruens as diferenças entre as medidas experimentais dos detetores de nível de grande e pequeno intervalo são devidas às diferentes características de cada detetor, a efeitos locais perto das junções dos medidores de pressão diferencial no fundo do "downcomer" e à presença de uma restrição no "downcomer" no caso do detetor de grande intervalo.

Na figura 3e é apresentada uma comparação entre a vazão no "downcomer" calculada pelo modelo descrito neste trabalho e a calculada pelo modelo de Bruens. Observa-se que a vazão calculada por Bruens tende a apresentar valores menores. Este fato é causado por simplificações feitas por Bruens na equação da quantidade de movimento como por exemplo, a não consideração do termo de acúmulo de quantidade de movimento. Estas simplificações provavelmente são as causadoras das discrepâncias na resposta do nível de água do modelo de Bruens.

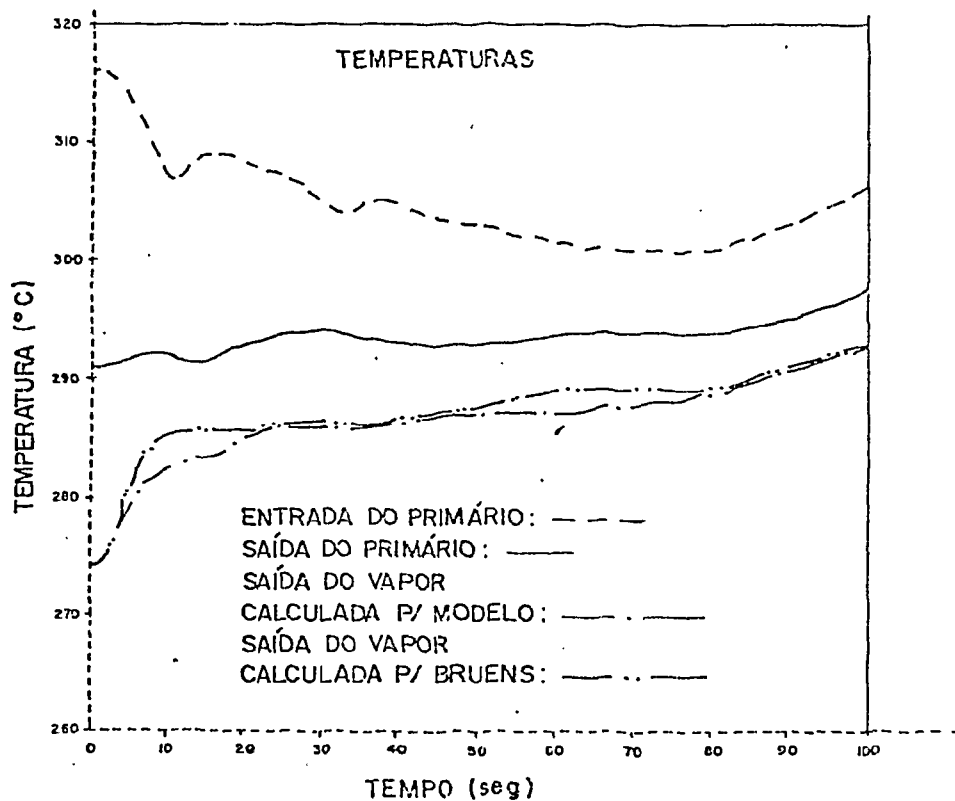
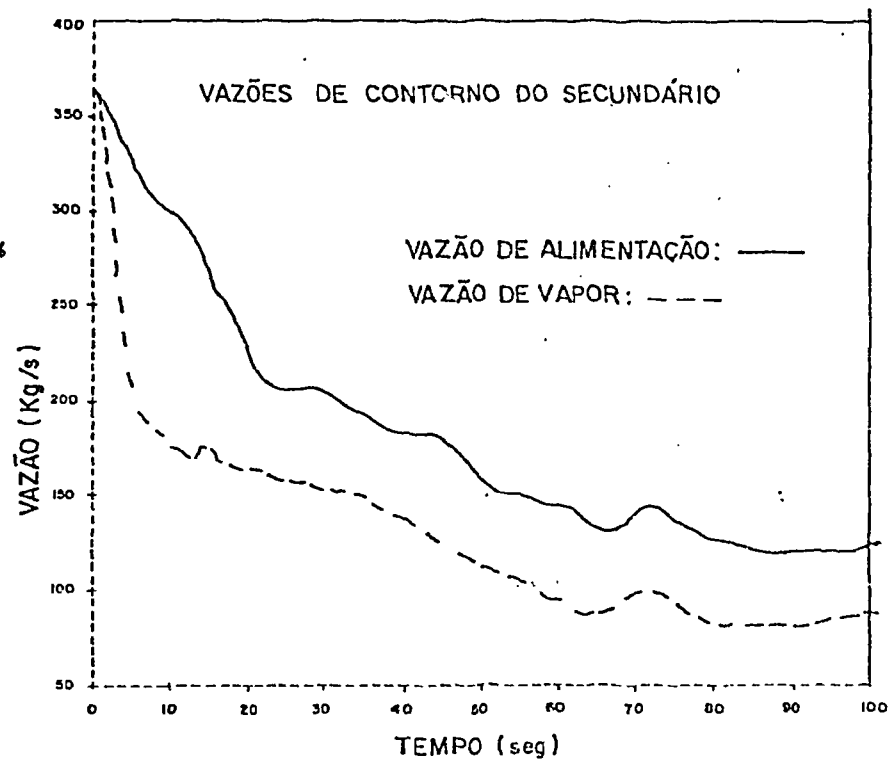


Figura 3 - Dados experimentais e resultados da simulação do gerador de vapor da usina nuclear KBC - 1.

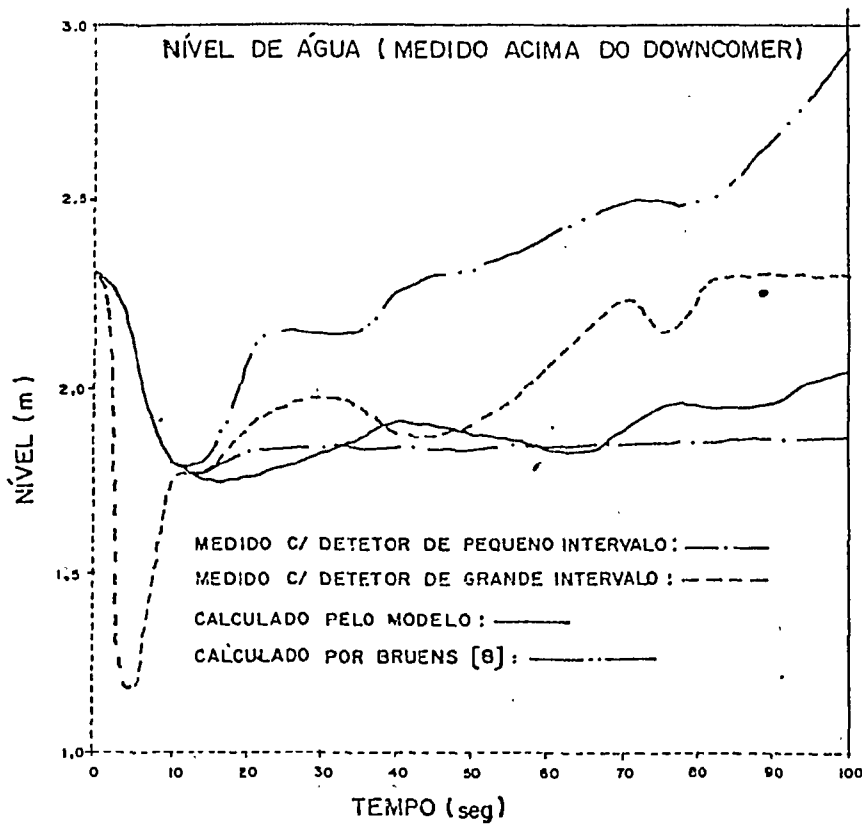
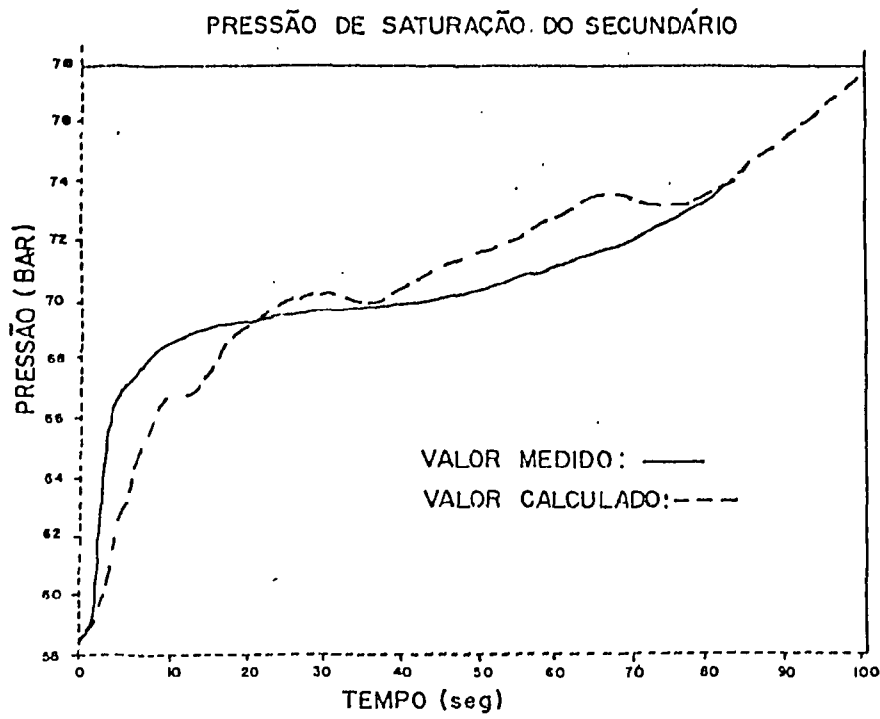


Figura 3 - Dados experimentais e resultados da simulação do gerador de vapor da usina nuclear KBC - 1.

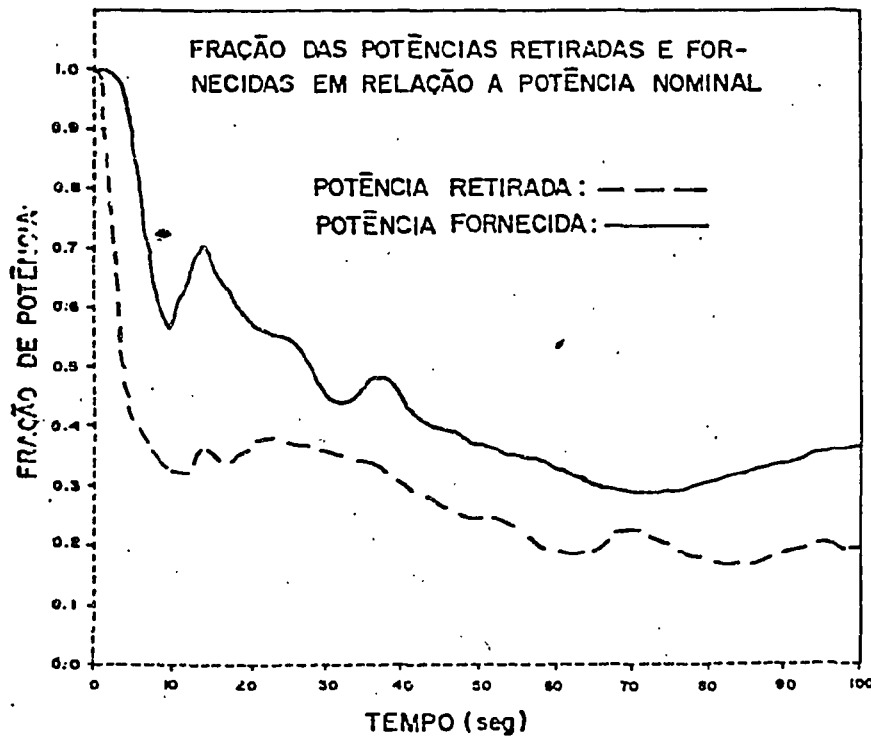
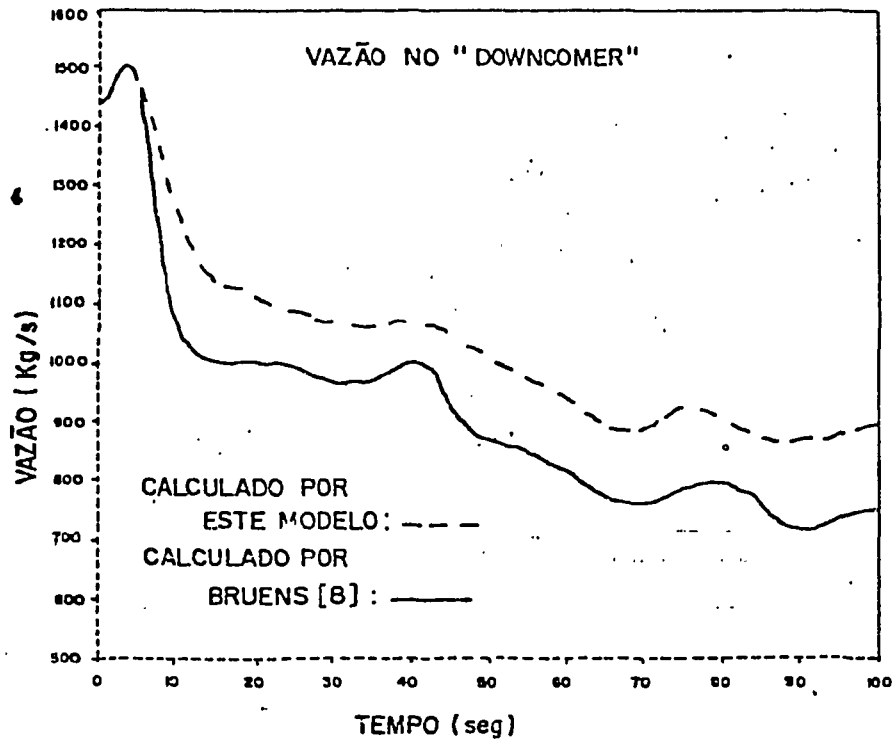


Figura 3 - Dados experimentais e resultados da simulação do gerador de vapor da usina nuclear KBC - 1.

## 6. Conclusões:

O objetivo deste trabalho, ou seja, o desenvolvimento de um programa computacional para o estudo do comportamento dinâmico de um gerador de vapor de tubos em U, foi atingido. A técnica de modelagem de divisão do sistema em volumes de controle e as hipóteses adotadas mostraram-se aceitáveis para a análise de um grande número de transientes. Porém o modelo desenvolvido não cobre as seguintes situações:

- . transientes muito rápidos na vazão de vapor, por exemplo , ruptura da tubulação de vapor e fechamento completo, na forma de degrau, da válvula de vapor;
- . inundação completa do gerador de vapor, ou evaporação completa do fluido secundário na região dos tubos;
- . escoamento bifásico do fluido primário.

A comparação dos resultados das simulações com dados experimentais mostraram as mesmas tendências e formas. As discrepâncias podem ser atribuídas à imprecisões nos dados experimentais e por simplificações do modelo, porém esta afirmativa não pode ser definitiva devido à insuficiência de medidas experimentais.

BIBLIOGRAFIA

1. TEN WOLDE, D.G., "Transient Behaviour of Nuclear Steam Generators". Ph.D Thesis, Delft University of Technology, Department of Mechanical Engineering, April 1972
2. ARWOOD, D.C. and KERLIN, T.W., "A Mathematical Model for an Integral Economizer U - Tube Steam Generator". Nuclear Technology, vol. 35 Aug. 1977
3. ALI, M.R.A., "Lumped Parameter, Steat Variable Dynamic Model for U - Tube Recirculation Type Nuclear Steam Generators". Ph.D Dissertation Nuclear Engineering Department, The University of Tennessee, Knoxville, Aug. 1976
4. HOEL, A. , "A Theoretical Model for the Calculation of Large Transients in Nuclear Natural-circulation U - Tube Steam Generator (Digital Code UTSG)", Nuclear Engineering and Design 47 (1978) 1-23
5. BRUENS, N.W.S., "PWR Plant and Steam Generator Dynamics", Ph.D Thesis, Delft University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Feb. 1981
6. EL WAKIL, N.M., "Nuclear Heat Transport", International Text book Company, Scranton, Pennsylvania, USA (1971)
7. COLLIER, J.G., "Convective Boiling and Condensation", McGraw-Hill Book Company, London (1972)
8. GARNAHAN, B., LEITHER, H.A., WILKES, J.O., "Applied Numerical Methods", John Wiley & Sons, New York (1976)