

## ANÁLISE TEÓRICA DA REMOÇÃO DE CALOR RESIDUAL POR UM GERADOR DE VAPOR COM BAIXO NÍVEL DE ÁGUA NO SECUNDÁRIO - TESTE PKL III A 5.2

ANIBAL N. GEBRIM  
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES/IPEN  
TRAVESSA R 400 - CIDADE UNIVERSITÁRIA-  
05508-900-SÃO PAULO- SP

### SUMÁRIO

Neste Trabalho, utilizou-se do modelo de cálculo termohidráulico DRUFAN para analisar o comportamento de um gerador de vapor em situação de circulação natural com baixo nível de água no secundário (PKL Teste III A 5.2). O modelo de cálculo DRUFAN é um dos três modelos disponíveis no sistema de cálculo ATHLET. Foram utilizadas seis diferentes tipos de nodalização para a análise do teste. Em todos os casos, ocorreram oscilações nas grandezas físicas, quando o nível de mistura ultrapassava a fronteira de um volume de controle. Para um caso, apesar das oscilações, a simulação deu continuidade e apresentou bons resultados.

### INTRODUÇÃO

A instalação experimental PKL, construída pela Siemens em Erlangen, Alemanha, entrou em operação em 1974 e foi inicialmente concebida para estudar acidentes de perda de refrigerante por grandes rupturas, com a atuação do sistema de resfriamento de emergência (PKL I). Também na série PKL I foram conduzidos alguns experimentos para estudar acidentes de perda de refrigeração por pequenas rupturas. A série de testes conduzida no PKL a partir de 1981, denominada PKL II, visava também o estudo da atuação dos sistemas de emergência no fim da despressurização de uma grande ruptura. A instalação PKL, série III, foi criada para estudar transientes com e sem perda de refrigeração, com os seguintes objetivos:

- adquirir conhecimento para futuras construções de reatores.
- criar um banco de dados para verificação de programas de cálculos termohidráulicos para análise de transientes.
- provar experimentalmente as simplificações e uniformizações das medidas de atuação do operador em casos de transientes.
- estudar a otimização da remoção de calor do reator, em casos de resfriamento pelo sistema de emergência.

O teste III A 5.2 conduzido na instalação experimento PKL (1), foi analisado com o código termohidráulico ATHLET. O experimento investiga a transferência de calor em um gerador de vapor com o nível de água no secundário bem abaixo do que o normal.

O programa de cálculo ATHLET, desenvolvido no GRS (Gesellschaft für Reaktorsicherheit), Alemanha, é composto por três modelos termohidráulicos distintos. O modelo termohidráulico mais simples e mais rápido é o modelo homogêneo que utiliza três equações de conservação para o fluido considerado como uma mistura (ALMOD). O segundo modelo termohidráulico utiliza quatro equações, 2 equações para a conservação de massa, 1 equação para a conservação de energia e outra para a

conservação de momento, mais o modelo de "drift" (DRUFAN). O último modelo é o mais completo, utilizando seis equações de conservação e foi desenvolvido para analisar a fase reinundação do núcleo do reator (FLUT).

Para análise deste teste utilizou-se o modelo termohidráulico contido no DRUFAN (2). O experimento foi analisado até o tempo de 3200 segundos. Neste tempo, a vazão de recirculação no gerador de vapor é zero há 1000 segundos e o nível colapsado no "downcomer" alcança a altura de 3 metros que corresponde aproximadamente 1/4 da sua altura inicial.

O programa utilizou-se de 1750 segundos de CPU, para simular os 3200 segundos de tempo de transitório em um computador AMDAHL 5870.

Um estado inicial confiável é alcançado somente com transiente nulo. Para isto rodou-se o programa até 1000 segundos, gastando 200 segundos de CPU.

Por causa de oscilações que ocorrem quando o nível de mistura ultrapassa a fronteira de um volume de controle para outro no "downcomer" e que conduzem a interrupção da simulação, diferentes nodalizações e geometrias foram tentadas para que o programa desse continuidade nos cálculos. No entanto, das seis nodalizações usadas somente uma deu continuidade aos cálculos.

### DESCRIÇÃO E PROCEDIMENTOS DO EXPERIMENTO

A instalação PKL (PrimärKreislauf) reproduz partes de um reator a água pressurizada da KWU. A instalação é composta por um núcleo com 314 aquecedores elétricos que produzem um total de 2.5 MW. O lado primário, incluindo o vaso de pressão, contém quatro circuitos com os correspondentes geradores de vapor e bombas. O ensaio experimental reproduz uma planta comercial de 1300 MWe em escala vertical (altura geodética) de 1:1. A potência, o volume e a área

transversal são representadas em escala 1:145 e a perda de pressão é representada em escala de 1:1.

O teste III A 5.2 investiga a remoção de calor residual do sistema primário através da transferência de calor em único gerador de vapor (os outros três foram isolados), com o nível de água bem abaixo do normal. Neste teste foram investigados os seguintes aspectos :

- comportamento da área de troca de calor, do coeficiente de transferência de calor, da diferença de temperatura média entre o primário e o secundário em um gerador de vapor com nível colapsado descendente.
- verificação do nível colapsado mínimo que assegure a remoção total da potência de decaimento.
- influência nas grandezas físicas do primário e no gerador de vapor, quando o nível colapsado é inferior ao mínimo.

O transitório tem início a partir de um estacionário com circulação natural. Após o estabelecimento do estacionário, fecha-se a válvula localizada na linha de suprimento do secundário e abre-se a válvula, localizada na linha de vapor, para evaporação e conseqüentemente decréscimo do nível de água.

Com estas medidas, o nível colapsado cai de 13 metros (valor nominal) para 0.6 metros em cerca de 4500 segundos, com uma taxa de evaporação média de 0.15 Kg/s. Quando o nível colapsado alcança o valor de 0.6 metros, a linha de suprimento do secundário é novamente ativada. Durante o total de 14000 segundos de experimento, várias estacionários para o nível colapsado foram estabelecidos para se estudar a transferência de calor no gerador de vapor.

Aproximadamente, por teste, foram gravados em fitas magnéticas 860 sinais, das 1070 posições de medidas disponíveis.

Foram medidas as seguintes grandezas físicas :

- temperatura do fluido e da parede ( 1,5 k)
- pressão absoluta ( 0,56 %) e diferencial ( 0,58%)
- nível colapsado ( 2,0 % do valor medido)
- vazão de massa mono e bifásico ( 0,5% no secundário)
- potência elétrica fornecida no núcleo

A porcentagem acima refere-se ao erro de fundo de escala, isto é, ao valor máximo da faixa de medida.

### MODELO PARA O CÁLCULO DO NÍVEL COLAPSADO

Por ser o fator preponderante na análise deste transiente e porque não dizer, em qualquer análise de segurança que se queira fazer de um gerador de vapor, o modelo de cálculo teórico do nível colapsado usado no código temohidráulico ATHLET, será descrito em detalhes aqui.

O código ATHLET dispõe de três diferentes volumes de controle para estudar fenômenos físicos que possam ocorrer, após um transiente operacional ou um acidente, em uma central nuclear : 1) volume de controle

homogêneo com líquido dominante, 2) volume de controle homogêneo com vapor dominante e 3) volume de controle heterogêneo.

As principais características destes volumes de controle são : No volume de controle homogêneo com vapor dominante, o líquido pode estar subesfriado e saturado e o vapor está sempre saturado. No volume de controle homogêneo com o líquido dominante acontece o contrário, o vapor pode estar saturado ou superaquecido e o líquido está sempre saturado. No volume de controle heterogêneo admitisse que exista uma discontinuidade na fração de vazio, delineada pelo nível de mistura. Abaixo deste, o fluido comporta-se como um volume de controle homogêneo com líquido dominante e acima o fluido comporta-se como o volume de controle homogêneo com vapor dominante.

Para se ter a posição do nível de mistura e subsequente cálculo do nível colapsado, inicialmente deriva-se respectivamente a qualidade do vapor para a parte inferior e superior ao nível de mistura ,

$$\chi^- = \frac{M^-_V}{M^-} = \frac{d\chi^-}{dt} = \frac{M^-_L \frac{dM^-_V}{dt} - M^-_V \frac{dM^-_L}{dt}}{(M^-)^2} \quad (1)$$

$$\chi^+ = \frac{M^+_V}{M^+} = \frac{d\chi^+}{dt} = \frac{M^+_L \frac{dM^+_V}{dt} - M^+_V \frac{dM^+_L}{dt}}{(M^+)^2} \quad (2)$$

Definindo-se a distribuição de massa e a sua respectiva derivada temporal no volume de controle heterogêneo, como,

$$\chi_{mm} = \frac{M^-}{M^- + M^+} \quad (3)$$

$$\frac{d\chi_{mm}}{dt} = \frac{M^+ \left( \frac{dM^-_L}{dt} + \frac{dM^-_V}{dt} \right) - M^- \left( \frac{dM^+_L}{dt} + \frac{dM^+_V}{dt} \right)}{(M^- + M^+)^2}$$

Utilizando-se de uma relação algébrica, que poderia ser entendida como o volume específico de todo o volume de controle heterogêneo :

$$v_{mm} = \chi_{mm} \left[ v^-_L (1 - \chi^-) + v^-_V \chi^- \right] + (1 - \chi_{mm}) \left[ v^+_L (1 - \chi^+) + v^+_V \chi^+ \right] \quad (4)$$

tem-se então, a massa do líquido e do vapor na parte inferior e superior ao nível de mistura, através das seguintes relações :

$$M^-_L = \frac{V(1 - \chi^-) \chi_{mm}}{v_{mm}} \quad (5)$$

$$M^-_V = \frac{V\chi^- \chi_{mm}}{v_{mm}} \quad (6)$$

$$M^+_L = \frac{V(1 - \chi^+) (1 - \chi_{mm})}{v_{mm}} \quad (7)$$

$$M^+_V = \frac{V\chi^+ (1 - \chi_{mm})}{v_{mm}} \quad (8)$$

As equações diferenciais e expressões acima, são completadas com as equações de conservação de massas para o líquido e vapor para a parte superior e inferior ao nível de mistura, integradas espacialmente :

$$\frac{dM^-_V}{dt} = \sum [w_v]_E - \sum [w_v]_S + \Psi^- - w_B \quad (9)$$

$$\frac{dM^-_L}{dt} = \sum [w_L]_E - \sum [w_L]_S - \Psi^- + w_C + w_T - w_E - w_V \quad (10)$$

$$\frac{dM_v^-}{dt} = \sum [w_v]^-_e - \sum [w_v]^-_s + \psi^+ + w_b - w_c + w_v \quad (11)$$

$$\frac{dM_v^+}{dt} = \sum [w_v]^-_e - \sum [w_v]^-_s - \psi^+ - w_f + w_c \quad (12)$$

onde  $W_B$  é a vazão de massa das bolhas de vapor que sobem.  $W_E$  é a vazão de massa de algumas gotas de água que são levadas juntamente com as bolhas de vapor (entrainment),  $W_F$  é a vazão de massa das gotas de água que retornam, mais a vazão de massa do filme de água que se forma na estrutura,  $W_C$  e  $W_V$  são respectivamente as vazões de massa causadas pela condensação e evaporação na superfície do nível de mistura. Estas vazões de massa são calculadas através dos modelos de "drift".

Com as massas do líquido e do vapor, obtém-se então o volume abaixo do nível de mistura :

$$V_{nm} = M_L^- v_L^-(p, h) + M_v^- v_v^-(p) + \sum_k V_k \quad (13)$$

onde o subíndice k indica os volumes de controle abaixo do volume de controle que contem o nível de mistura.

Conhecido o volume total abaixo do nível de mistura a cada tempo de integração, tem-se então a posição do nível de mistura a partir de uma função,  $H_{nm} = f(V_{nm})$ , que é traçada a partir dos dados geométricos.

O volume colapsado é determinado da seguinte forma :

$$V_c = v^-_i (1 - \alpha^-_i) + v^+_i (1 - \alpha^+_i) + \sum_i V_i (1 - \alpha_i) \quad (14)$$

onde o subíndice i indica os volumes de controle acima e abaixo do nível de mistura e o subíndice j indica o volume de controle que contem o nível de mistura.

Da mesma forma que para a posição do nível de mistura, a posição do nível colapsado é obtido com a ajuda da mesma função, previamente traçada a partir dos dados geométricos,  $H_{CL} = f(V_{CL})$ .

O código termohidráulico ATHLET opta, por uma questão de economia computacional, integrar as equações diferenciais de (1) à (3), juntamente com as relações algébricas de (5) até (8), ao invés de integrar as equações de (9) à (12), para calcular as massas do líquido e do vapor.

### TRANSPosição DO NÍVEL DE MISTURA

Abaixo é descrito o processo de transposição do nível de mistura de um volume de controle para outro, que é utilizado no código ATHLET. Este processo de transposição ocorre quando o nível de mistura alcança uma determinada região da parte inferior ou superior do controle de volume.

Após cada integração temporal, verifica-se se a posição do nível de mistura alcançou o volume de fronteira,  $e_{nm} V_i$ . Quando isto ocorre, a posição do nível de mistura,  $H_{nm}$ , é então deslocado para volume de controle  $V_{i-1}$ , quando  $V_i < e_{nm} V_i$ . O fator  $e_{nm}$  usado é em torno de  $10^{-4}$ . Para um nível de mistura subindo um volume de controle, o procedimento de transposição é semelhante ao de decaindo.

O volume de controle  $V_{i-1}$ , que era homogêneo, é agora transformado em heterogêneo com um volume superior  $V_{i-1}^+$  e inferior  $V_{i-1}^-$ , bem como uma nova

posição do nível de mistura  $H_{nm}$ , que é determinado por uma função previamente definida a partir dos dados geométricos de entrada.

$$(V_{i-1}^+)^{novo} = e_{nm} V_{i-1} \quad (15)$$

$$(V_{i-1}^-)^{novo} = (1 - e_{nm}) V_{i-1} \quad (16)$$

$$e \quad (H_{nm})^{novo} = f((V_{i-1}^-)^{novo}) \quad (17)$$

### MODELAGEM DO TESTE COM O ATHLET E RESULTADOS

Ao invés de simular por completo a planta experimental PKL, optou-se por simular somente o gerador de vapor. A inserção do transitório deu-se através das condições de contorno.

O lado secundário do gerador de vapor do teste III A 5.2 foi modelado com os seguintes objetos (Figura 1) : "Downcomer" (DC) inferior, "Riser", Separador, "Downcomer" (DC) superior e Compartimento de Vapor (Dome). O lado primário foi modelado com 2 objetos: SGA e SGB. As condições de contorno, vazões de entrada e de saída e entalpia de entrada, são modelados com os chamados "fills". "Fill" negativo é usado para simular as vazões de saída. O nível de mistura encontra-se inicialmente localizado no "downcomer" superior.

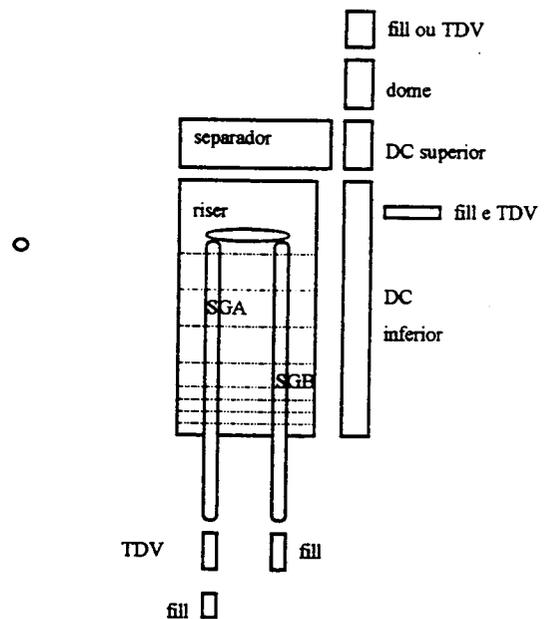


Figura 1 : Objetos utilizados na discretização do gerador de vapor do experimento PKL III A 5.2.

As pressões de contorno são simuladas através dos chamados "Time Dependent Volume" (TDV). Na figura 4 pode-se observar que para os objetos SGA, SGB e Riser, usou-se uma fina nodalização na parte inferior. Isto se deve ao fato de que o perfil de temperatura varia muito nesta parte do gerador de vapor. Abaixo é descrito duas das

cinco nodalizações utilizadas no downcomer e os resultados obtidos :

As condições iniciais para efetuação dos cálculos no transitório, foram :

- potência : 430 kW
- diferença de temperatura entre o primário e secundário (entrada) : 48 °K
- pressão do primário : 35 bar
- temperatura de saída do núcleo : 235°C
- vazão no primário : 1,6 kg/s
- nível de mistura : 11,5 m
- pressão no compartimento de vapor : 11 bar
- temperatura no "downcomer" : 186 °C
- vazão de água alimentação : 0,13 kg/s

Abaixo é mostrado os resultados obtidos com duas das seis nodalizações utilizadas no "downcomer" :

**Primeira Nodalização.** Nesta primeira nodalização (Figura 2), as oscilações aconteceram no primeiro nó do "downcomer" inferior, em aproximadamente 800 segundos de transitório e a simulação foi interrompida. Figuras 3 e 4 mostram respectivamente o nível colapsado e a vazão de recirculação no secundário do gerador de vapor.

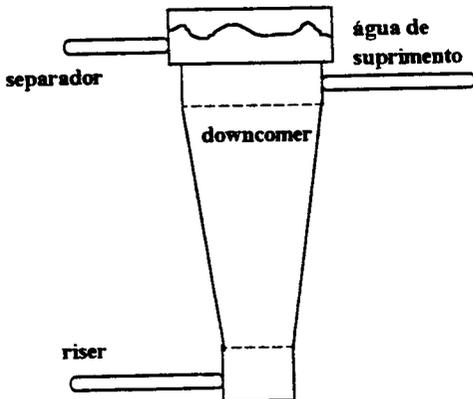


Figura 2 : Uma das geometrias e nodalizações do "Downcomer" que não deram continuidade a simulação devido as oscilações.

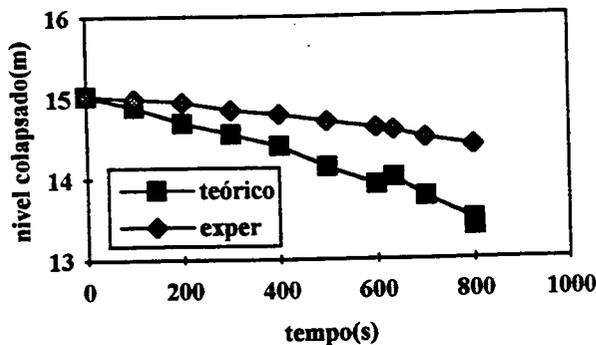


Figura 3 : Comparação entre os resultados teóricos e experimentais para o nível colapsado.

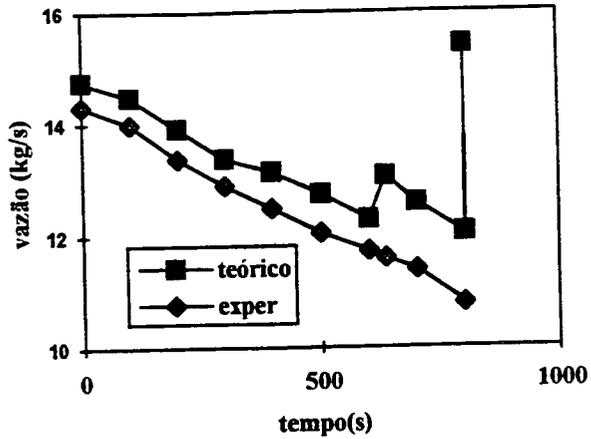


Figura 4 : Comparação entre os resultados teóricos e experimentais para a vazão de recirculação.

**Segunda Nodalização.** Com a geometria um pouco modificada e a nodalização semelhante a anterior (Figura 5), os cálculos deram prosseguimento apesar das oscilações no primeiro nó.

Nas Figuras 6 até 12 são apresentadas os resultados para o nível colapsado, vazão de recirculação, temperaturas de saída para o lado primário e secundário, vazão e pressão de saída do lado secundário e a taxa de transferência de calor entre o primário e secundário.

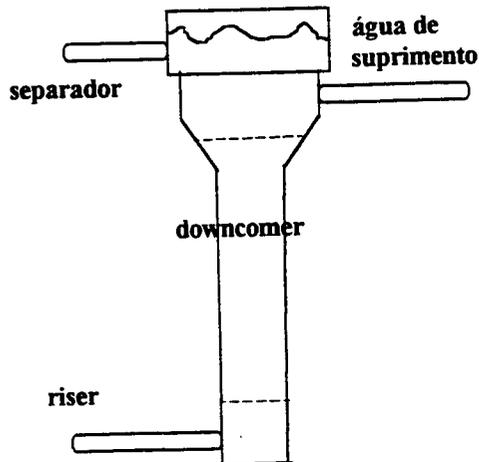


Figura 5 : Geometria e nodalização que deram continuidade a simulação, apesar das oscilações.

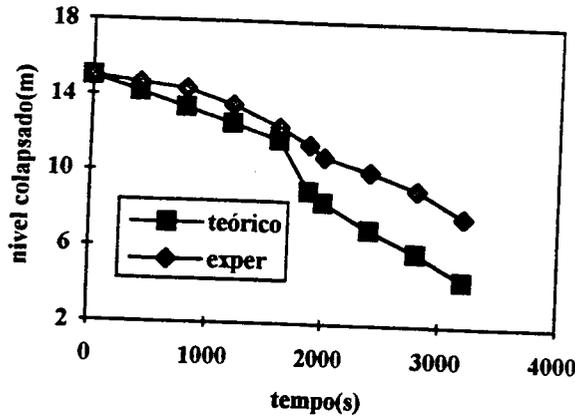


Figura 6 : Comparação entre os resultados teóricos e experimentais para o nível colapsado.

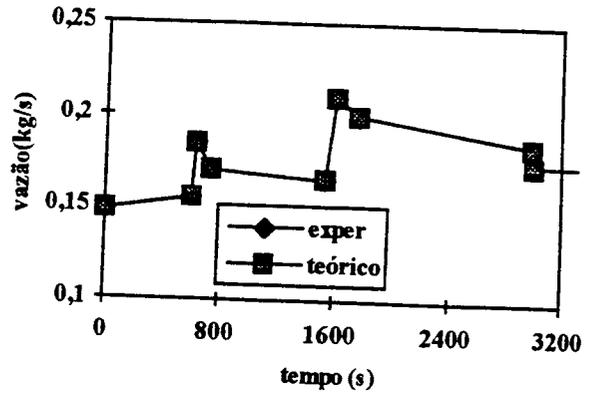


Figura 9 : Comparação entre os resultados teóricos e experimentais para a vazão de saída no secundário.

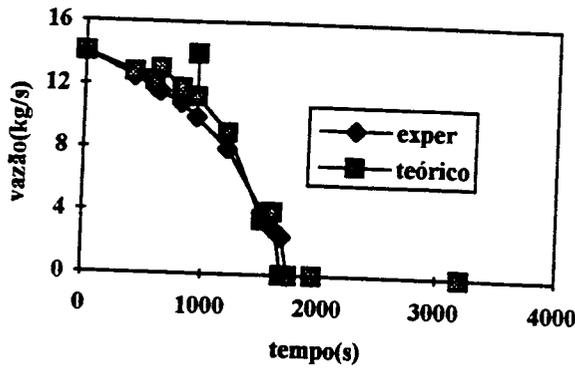


Figura 7 : Comparação entre os resultados teóricos e experimentais para a vazão de recirculação.

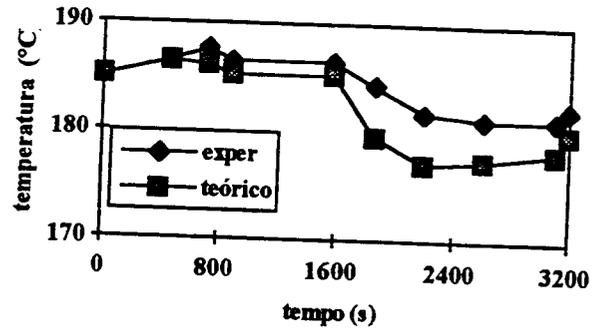


Figura 10 : Comparação entre os resultados teóricos e experimentais para a temperatura de saída do lado primário.

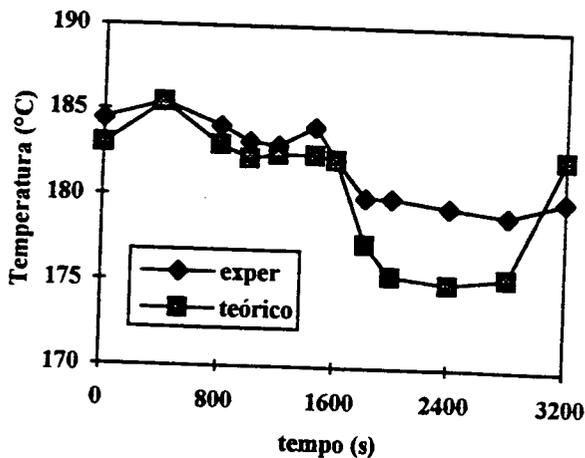


Figura 8 : Comparação entre os resultados teóricos e experimentais para temperatura de saída do lado secundário.

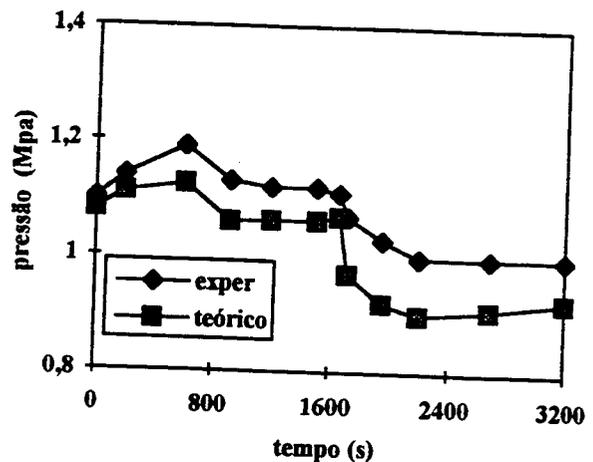


Figura 11 : Comparação entre os resultados teóricos e experimentais para a pressão de saída do lado secundário.

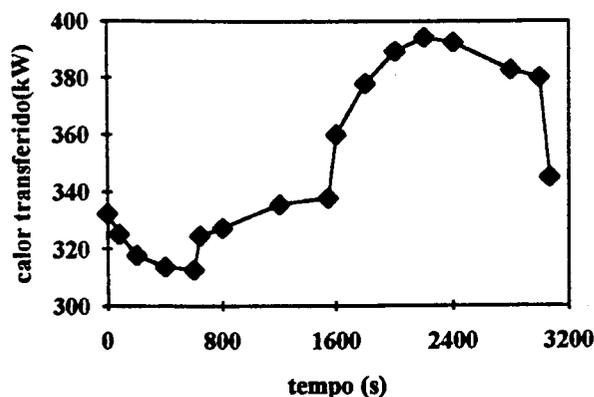


Figura 12 : Resultados teóricos para da taxa de transferência de calor.

### CONCLUSÕES

Não foi possível conseguir um estado estacionário usando baixos valores para o fator de convergência nos cálculos da transferência de calor. Um estado inicial confiável foi possível através do transiente nulo. Para isto, necessitou-se cerca de 1000 segundos de transiente, o que correspondeu aproximadamente 200 segundos de CPU.

Para diferentes nodalizações, 5 ao total, os cálculos foram interrompidos. A quebra da estabilidade do programa, aconteceu sempre que o nível de mistura ultrapassou a fronteira de um volume de controle. Apenas com a segunda nodalização, Figura 5, os cálculos não foram interrompidos, apesar das oscilações apresentadas. Para esta caso os resultados (Figuras 6 à 12), podem ser consideradas boas.

Para programas de cálculos de grande porte, como é o caso do ATHLET, é difícil saber quais são os motivos destas oscilações. Tudo indica que o problema esteja na simulação do separador, mais precisamente na interligação deste com o volume de controle que carrega o nível de mistura, volume de controle heterogêneo. A segunda hipótese é o processo de transferência do nível de mistura de um volume de controle para outro.

Durante o período em que o transitório foi analisado, as temperaturas sempre estiveram num patamar aceitável, isto é, em nenhum momento os valores das temperaturas ameaçaram a integridade dos tubos do gerador de vapor. Desta maneira, pode-se dizer que mesmo com o nível de água abaixo do normal, a retirada do calor produzido continuou, e foi suficiente para manter as temperaturas e pressões dentro dos padrões aceitáveis de segurança.

### REFERÊNCIAS

[1] Versuch PKL III A 5.2 - Ausfall der Speisewasserversorgung - U 9 312/89/25 - Siemens AG - Maschinen und Verfahrenstechnische Labours - Erlangen - Mai 1989.

[2] F. Steinhoff, Thermo- und Fluidodynamikmodelle im Rechenprogramm DRUFAN und im Nachfolgeprogramm ATHLET zur Simulation von Separationsvorgängen und Gemischspiegelbewegungen in vertikalen Strömungskanälen, GRS-A-1539 und 1540, März 1989.

### ABSTRACT

The PKL (PrimärKreislauf) Test III A 5.2 ( Heat transfer in one Steam Generator with low water level ) was investigated with ATHLET code. It was used six different kinds of nodalization to analyse this test. In all cases occurred oscillations in the physical variables, when the mixture level was crossing the frontier of a control volume. In only one case the simulation was continued until 3200 seconds although of oscillations. In this case the theoretical results show good agreement with experimental data.