

## SIMULAÇÃO COM O CÓDIGO TRAC-PFI DE UM APRPPR REALIZADO NO CIRCUITO EXPERIMENTAL BETHSY

ANTONIO TEIXEIRA E SILVA\*  
ANTONIO BELCHIOR JUNIOR\*\*  
JOSÉ MESSIAS DE OLIVEIRA NETO\*

\* Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN  
\*\* Coordenadoria para Projetos Especiais - COPESP

### RESUMO

Os resultados do cálculo pré-teste com o código TRAC-PFI para um acidente de perda de refrigerante primário por uma ruptura de 2" em uma das pernas frias do circuito são comparados com os resultados obtidos do experimento definido como Problema Padrão Internacional no. 27 e desenvolvido no circuito experimental francês BETHSY. Os resultados do cálculo demonstram as potencialidades do código em prever a maioria dos fenômenos que ocorrem durante o lento transiente termohidráulico, mas apresentam uma considerável discrepância em relação aos resultados experimentais, especialmente no tempo de evolução dos processos envolvidos no transiente.

### INTRODUÇÃO

A avaliação da segurança de uma central nuclear requer o uso de códigos computacionais de análise termohidráulica sofisticados. Um meio efetivo para verificar a precisão e validade dos modelos destes códigos é fornecido por Problemas Padrões Internacionais ("International Standard Problems - ISP"), onde os códigos são comparados entre si e a experimentos padrões. Este tipo de exercício é um dos objetivos de um extenso programa de pesquisa envolvendo um grande número de países em cooperação com uma organização internacional ("Committee on the Safety of Nuclear Installations-CSNI"). Os Problemas Padrões podem ser fornecidos como problemas pré-teste ou pós-teste. Na fase denominada pré-teste, os resultados experimentais não são conhecidos pelos participantes até a entrega de seus cálculos. Na fase pós-teste, os resultados experimentais são fornecidos aos participantes antes que a simulação seja iniciada.

O IPEN-CNEN/SP participou da fase pré-teste do ISP no. 27 [1] proposto pelo Departamento de Termohidráulica e Física do COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE (CEA) e aceito pela OECD/NEA-CSNI. O ISP-27 foi baseado em um experimento desenvolvido no circuito experimental BETHSY [2], situado no Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble (CENG). Este circuito é um modelo em escala reduzida de um reator PWR FRAMATOME de 900 MWe, projetado para estudar transientes (acidentes) em reatores PWR com o duplo propósito de contribuir para o desenvolvimento do código CATHARE e para verificação de procedimentos operacionais de emergência. O objetivo do ISP-27 é o teste 9.1.b, um acidente de perda de refrigerante primário por pequena ruptura (APRPPR), consistindo de uma ruptura de 2" em uma das pernas frias do circuito, sem atuação do Sistema de Injeção de Alta Pressão (HPIS) e com a aplicação atrasada de uma ação final de gerenciamento do acidente: a abertura da válvula de alívio do gerador de vapor para a atmosfera, que causa a despressurização do circuito primário.

Este trabalho compara os resultados da simulação pré-teste desenvolvida com o código TRAC-PFI [3] para o ISP-27 com os resultados obtidos no experimento, visando verificar as capacidades e limites do código em relação aos fenômenos envolvidos no acidente.

### O CIRCUITO EXPERIMENTAL BETHSY

O circuito experimental BETHSY, representado esquematicamente na Fig. 1, foi construído na França para analisar acidentes em reatores PWR controlados por sistemas de segurança automáticos e/ou por ação do operador. Ele foi projetado para modelar o reator de três circuitos de

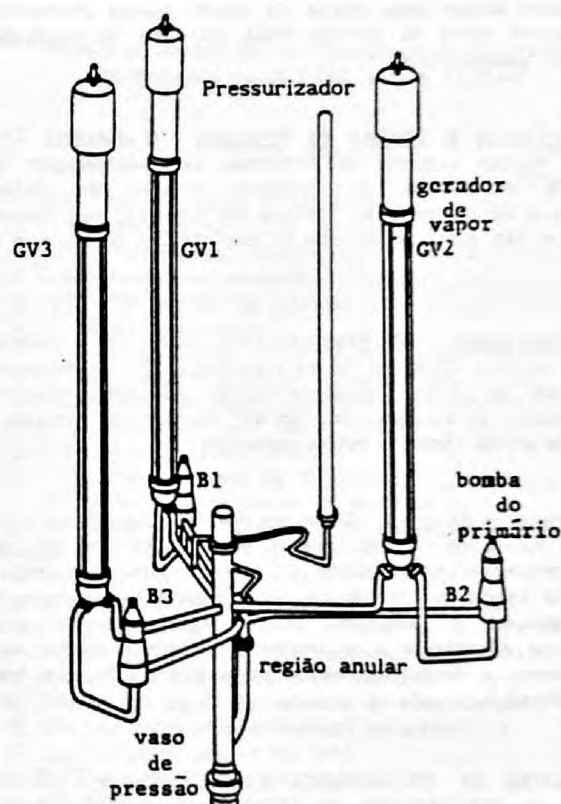


Fig.1 - Representação Esquemática do Circuito BETHSY.

refrigeração da FRAMATOME com 2775 MWth (900 MWe). O fator de escala global do circuito é de 1/100 e a altura dos componentes mantém a proporção 1/1 para simular os fenômenos da circulação natural quando do desligamento das bombas de circulação do reator. As pressões nominais de operação podem atingir 17,2 MPa e 8 MPa nos circuitos primário e secundário, respectivamente. Um aspecto importante no projeto é a potência máxima no núcleo, limitada a 3MW, que corresponde a 10 % do valor que deveria ter o circuito BETHSY mantido o fator de escala global acima. Isto reduz a potência disponível no teste a níveis do calor de decaimento, mas que é ainda aceitável para propósitos experimentais, cujo objetivo é verificar situações físicas envolvendo escoamento bifásico. Outro aspecto interessante do circuito BETHSY está no critério adotado para tornar as perdas de calor pelas estruturas mais próximas às do reator de referência. A taxa de calor perdida em um circuito experimental é maior do que a da planta real, devido às maiores superfícies de transferência de calor e ao grande número de funções

mecânicas e penetrações de isolamento. Para resolver este problema, um sistema de aquecimento elétrico ("Trace Heating") foi instalado para compensar as inevitáveis perdas de calor. Ele foi mantido operacional desde o início do transiente até a injeção de água pelos acumuladores e, então, foi desligado. Cada um dos componentes do reator original, vaso de pressão, tubulações, bombas, pressurizador e geradores de vapor (descritos a seguir) são reproduzidos em escala reduzida. Os circuitos de segurança estão também presentes.

**Vaso de Pressão:** O núcleo cilíndrico é composto de 428 varetas aquecidas eletricamente e 29 tubos guias arranjados em uma configuração 17x17, produzindo uma densidade de potência axial cossenoidal com fator de pico de 1,6 e uma radial uniforme. A região anular ("downcomer") é representada por uma tubulação externa ao vaso de pressão, conectando a junção das três pernas frias à parte inferior do núcleo. A parte superior da região anular é equipada com um dispositivo trifólio para evitar uma vazão de desvio muito grande e não representativa entre as pernas frias no caso de condições de escoamento assimétricas.

**Tubulações e Bombas do Primário** O circuito BETHSY possui o mesmo número de circuitos de refrigeração que o reator de referência. O diâmetro interno de todas as tubulações é de 118 mm. As bombas do primário têm velocidade ajustável e são capazes de operar com fluido bifásico e vapor puro.

**Pressurizador** O Pressurizador pode ser conectado a qualquer um dos circuitos de refrigeração. Ele é equipado com aquecedores do tipo ligado-desligado ou com aquecedores proporcionais. O sistema de "spray" normal e auxiliar e o sistema de alívio também estão presentes.

**Geradores de Vapor** Cada um dos três geradores de vapor possui 34 tubos em U com raios e espaçamentos arranjados de forma a preservar o diâmetro hidráulico do lado secundário do gerador de vapor de referência. Os sistemas de alimentação de água principal e auxiliar podem operar com vazão e temperatura ajustáveis e o sistema de vapor inclui válvulas de isolamento e desvio de vapor para a atmosfera e para os condensadores.

**Sistema de Resfriamento de Emergência** Todos os sistemas de resfriamento de emergência estão presentes (Sistema de Injeção de Alta Pressão-HPIS, Sistema de Injeção de Baixa Pressão-LPIS e acumuladores).

**Ruptura** A ruptura pode ser localizada em vários pontos da tubulação. A água que sai pela ruptura passa por uma tubulação instrumentada e é coletada em um tanque de despressurização.

**Instrumentação** A informação detalhada dos fenômenos que ocorrem nos circuitos primário e secundário é fornecida por mais de 1200 transdutores a uma taxa de amostragem de 2 Hz.

#### DESCRÇÃO DO PROBLEMA SIMULADO

O experimento do problema padrão ISP-27 consistiu de um acidente de perda de refrigerante primário por uma ruptura de 2" na perna fria do primeiro circuito de refrigeração do circuito experimental BETHSY. Devido ao pequeno tamanho da ruptura, a pressão do sistema cai lentamente, atingindo o limite para atuação do HPIS. Como a falha deste sistema é assumida, ocorre o descobrimento do núcleo e o aquecimento da vareta elétrica, requerendo a implementação de uma ação final. Esta ação é retardada até que a temperatura máxima do revestimento da vareta elétrica atinja 450 C. A esta temperatura, é feito o desvio de vapor nos três geradores de

vapor da planta para a atmosfera, permitindo despressurização do sistema secundário (e, consequentemente, do sistema primário), até que o limite de pressão para injeção de água pelos acumuladores é atingido. Após o isolamento dos acumuladores, a pressão decai ao nível de atuação do LPIS. O problema termina quando são estabelecidas as condições estáveis do Sistema de Remoção de Calor Residual (RHRS). Os principais eventos que compõem o cenário do acidente são sumarizados a seguir:

$t = 0 \text{ s}$	: Início do transiente;
$P+P = 13.1 \text{ MPa}$	: Sinal de desligamento (atraso de 17 s);
$P+P = 11.9 \text{ MPa}$	: { Sinal para o HPIS (falha assumida) Desvio da água de alimentação principal};
30 s após HPIS	: Conexão da água de alimentação auxiliar;
300 s após HPIS	: Início da queda inercial da bomba;
$T_{\max} = 450 \text{ C}$	: Despressurização dos geradores de vapor;
$P+P = 4.2 \text{ MPa}$	: Entrada dos acumuladores;
$P+P = 1.5 \text{ MPa}$	: Isolamento dos acumuladores;
$P+P = 0.91 \text{ MPa}$	: Acionamento do LPIS;
$T_{\text{sn}} < 177 \text{ }^\circ\text{C}$ $P+P < 2.5 \text{ MPa}$ $\Delta T_{\text{sub}} > 20 \text{ }^\circ\text{C}$	: Final do experimento;

onde  $P+P$  é a pressão no topo do pressurizador,  $T_{\max}$  é a temperatura máxima do encamisamento,  $T_{\text{sn}}$  é a temperatura na saída do núcleo e  $\Delta T_{\text{sub}}$  é a margem de saturação da água.

#### MODELAGEM COM O CÓDIGO TRAC-PFI

A modelagem do circuito BETHSY com o código TRAC-PFI Versão 7.6 utilizou pelo menos um de cada componente disponível no código com exceção do componente VESSEL (modelo tridimensional para o vaso de pressão). A modelagem consistiu de 52 componentes perfazendo um total de 201 células e 60 junções. As Figs. 2-5 apresentam esquematicamente a divisão em componentes utilizada na modelagem, sendo que o número atribuído a cada componente foi colocado no interior do mesmo e o número das junções colocado ao lado das setas que as representam. A Tab. 1 apresenta a descrição de cada um dos componentes utilizados. Esta modelagem foi utilizada em regime permanente, sofrendo algumas modificações na fase transiente para representar a atuação dos sistemas de resfriamento de emergência.

A perna fria 1, onde ocorre a ruptura, foi representada por um componente TEE, sendo o tubo secundário deste TEE utilizado para representar a quebra. Este tubo foi conectado a um componente BREAK que mantinha a pressão de 0,1 MPa como condição de contorno. A geometria da ruptura foi isolada como um componente único para determinar os valores de  $K$ , onde  $K$  é a soma dos coeficientes de perda de pressão por atrito, singular e de forma. Os valores de  $K$  foram determinados com base nos testes de caracterização deste tipo de ruptura realizados no circuito experimental super MOBY-DICK [4]. Eles foram obtidos de modo a representar a vazão através da ruptura nas condições médias de pressão e temperatura que ocorrem durante o transiente.

Os coeficientes de perda de pressão no circuito foram calculados com base nos valores apresentados no Anexo B de [1], cobrindo uma grande faixa de operação. Foram utilizados os coeficientes para as condições fornecidas às mais próximas possíveis do estado estacionário.

Nem as perdas de calor pelas estruturas nem os aquecedores elétricos para compensá-las foram representadas. No início do transiente estes efeitos se cancelam e só se tornam efetivos após a entrada dos acumuladores, quando os aquecedores são desligados. A consideração destes efeitos com o código TRAC-PFI seria bastante complicada, envolvendo

inclusive a reentrada de todos os dados de entrada para se conseguir representar o desligamento dos aquecedores. Deve ser notado que após a entrega dos calculos pré-teste apresentados neste trabalho, outra simulação com o TRAC-PF1 foi desenvolvida considerando as perdas de calor pelas estruturas. Entretanto, não houve modificação substancial nos resultados de cálculo.

O circuito secundário foi representado por condições de contorno fornecidas na descrição do problema para a entrada da água de alimentação e para a saída da linha de vapor dos três geradores de vapor do circuito.

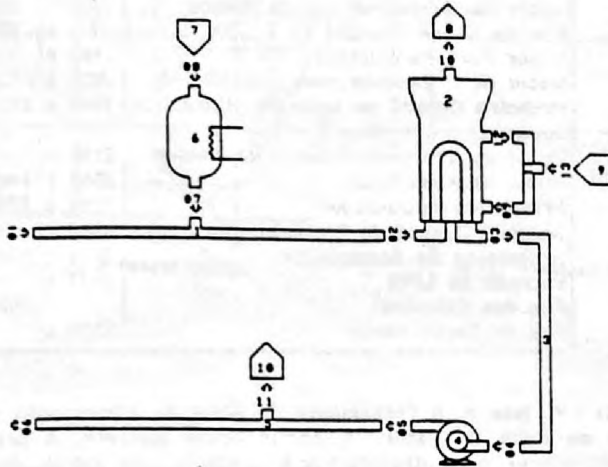


Fig. 2 - Modelagem do Circuito de Refrigeração 1.

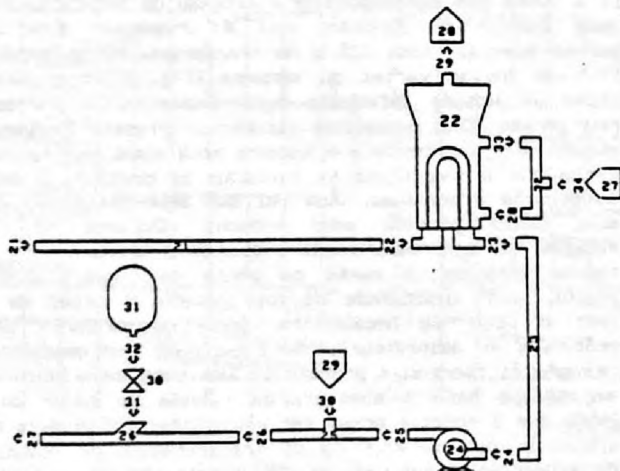


Fig. 3 - Modelagem do Circuito de Refrigeração 2.

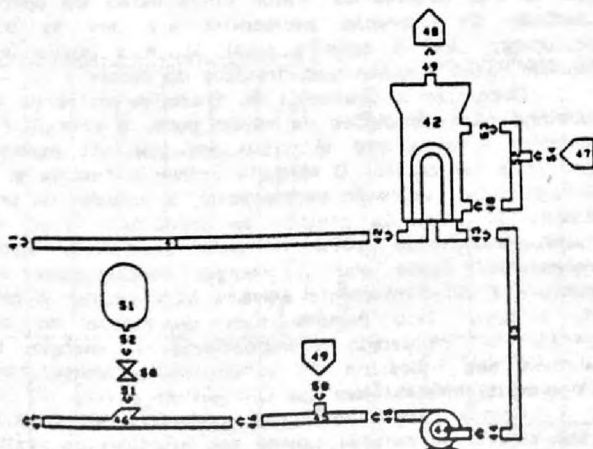


Fig. 4 - Modelagem do Circuito de Refrigeração 3.

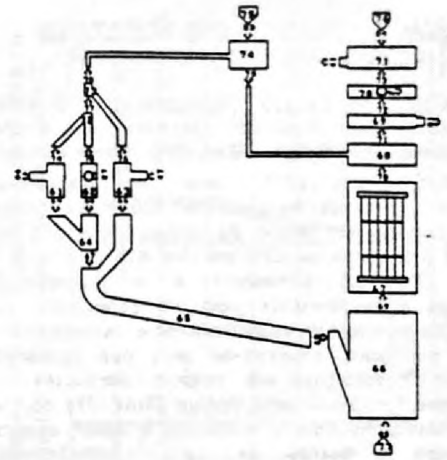


Fig. 5 - Modelagem do Vaso de Pressão.

Tabela 1. Descrição dos Componentes Utilizados na Modelagem do BETHSY com o TRAC-PF1.

No.	Tipo de Componente	Descrição	No. de células (prim,sec)
1	TEE	Perna quente do circuito 1	4,5
2	STGEN	Gerador de vapor do circuito 1	8,5,1
3	PIPE	Perna intermediária do circuito 2	7
4	PUMP	Bomba do circuito 1	2
5	TEE	Perna fria do circuito 1	3,1
6	PRIZER	Pressurizador	4
7	FILL	Condição de contorno p/ o comp. PRIZER	1
8	BREAK	Cond. de cont. p/ saída do sec. do GV1	1
9	FILL	Cond. de cont. p/ entrada do sec. do GV1	1
10	FILL	Cond. de cont. p/ a ruptura de 2"	1
11	TEE	Região anular do GV1	4,2
21	PIPE	Perna quente do circuito 2	4
22	STGEN	Gerador de vapor do circuito 2	8,5,1
23	PIPE	Perna intermediária do circuito 2	7
24	PUMP	Bomba do circuito 2	2
25	TEE	Perna fria do circuito 2 (LPIS)	2,1
26	TEE	Perna fria do circuito 2 (Acumulador)	3,1
27	FILL	Cond. de cont. p/ entrada do sec. do GV2	1
28	BREAK	Cond. de cont. p/ saída do sec. do GV2	1
29	FILL	LPIS conectado ao circuito 2	1
30	VALVE	Válvula de isolamento do acumulador 2	2
31	ACCUM	Acumulador conectado ao circuito 2	3
32	TEE	Região anular do GV2	4,2
41	PIPE	Perna quente do circuito 3	4
42	STGEN	Gerador de vapor do circuito 3	8,5,1
43	PIPE	Perna intermediária do circuito 3	7
44	PUMP	Bomba do circuito 3	2
45	TEE	Perna fria do circuito 3 (LPIS)	2,1
46	TEE	Perna fria do circuito 3 (Acumulador)	3,1
47	FILL	Cond. de cont. p/ entrada do sec. do GV3	1
48	BREAK	Cond. de cont. p/ saída do sec. do GV3	1
49	FILL	LPIS conectado ao circuito 3	1
50	VALVE	Válvula de isolamento do acumulador 3	2
51	ACCUM	Acumulador conectado ao circuito 3	3
52	TEE	Região anular do GV3	4,2
61	TEE	Região anular do vaso de pressão	1,1
62	TEE	Região anular do vaso de pressão	1,1
63	TEE	Região anular do vaso de pressão	1,1
64	TEE	Região anular do vaso de pressão	1,1
65	TEE	Região anular do vaso de pressão	4,1
66	TEE	Pleno inferior do vaso de pressão	6,1
67	CORE	Núcleo	7
68	TEE	Pleno superior	4,1
69	TEE	Pleno superior	1,1
70	TEE	Pleno superior	1,1
71	TEE	Pleno superior	1,1
72	TEE	Desvio da reg. anular p/ cabeça do vaso	1,1
73	TEE	Desvio da reg. anular p/ cabeça do vaso	1,1
74	TEE	Cabeça do vaso de pressão	1,9
75	FILL	Cond. de cont. de velocidade nula	1
76	FILL	Cond. de cont. de velocidade nula	1
77	FILL	Cond. de cont. de velocidade nula	1

**COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

**Cálculo do Estado Estacionário.** O cálculo do estado estacionário foi realizado através da opção "generalized steady state" do código TRAC-PF1. Para atingir o critério de convergência de  $10^{-3}$  para as variáveis do estado estacionário, foram necessários 526 s de tempo de problema com intervalos de tempo da ordem de 0,1 s, o que consumiu cerca de 4,5 horas de CPU no IBM 4381.

A Tab. 2 apresenta a comparação dos principais resultados experimentais com os resultados calculados. Com exceção da massa dos acumuladores e da temperatura máxima das varetas elétricas, observa-se uma boa concordância entre os principais resultados em regime permanente. A massa do acumulador fornecida pelo código TRAC-PF1 corresponde a massa total neste componente, enquanto o valor experimental refere-se apenas a massa de água, justificando a diferença observada. A temperatura máxima calculada para o revestimento da vareta elétrica corresponde a uma temperatura média máxima ao longo do seu comprimento, portanto, abaixo do valor obtido experimentalmente.

Um aspecto interessante do cálculo no estado estacionário foi a não obtenção da convergência do nível de água do lado secundário do gerador de vapor (GV). Vários testes de sensibilidade foram desenvolvidos com o GV isolado, mas em nenhum dos casos ocorreu a convergência simultânea da massa e do nível de água do secundário de acordo com os valores experimentais fornecidos. Como a convergência apontava um valor correto para a massa de água no GV, optou-se por conservar o nível de água apresentado na convergência, que neste caso apontava um valor menor do que o obtido experimentalmente.

**Tabela 2. Comparação dos Principais Resultados Experimentais e Calculados para o Estado Estacionário.**

Variável	valor experim.	valor calculado
Massa do Primário (t)	1,96	1,96
Massa do GV1 (kg)	823,28	828,14
Massa do GV2 (kg)	828,23	826,67
Massa do GV3 (kg)	819,69	829,11
Massa do Acumulador 2 (kg)	276,49	291,99
Massa do Acumulador 3 (kg)	279,13	291,99
Pressão Secundário GV1 (MPa)	6,93	6,91
Pressão Secundário GV2 (MPa)	6,91	6,91
Pressão Secundário GV3 (MPa)	6,89	6,91
Pressão Topo Pressurizador (MPa)	15,51	15,51
Pressão Topo Acumulador 2	4,18	4,18
Pressão Topo Acumulador 3	4,18	4,18
Vazão Mássica Região Anular Vaso (kg/s)	150,34	145,84
Água de Alimentação GV1 (kg/s)	0,52	0,52
Água de Alimentação GV2 (kg/s)	0,52	0,52
Água de Alimentação GV3 (kg/s)	0,52	0,52
Vazão de Vapor GV1 (kg/s)	0,51	0,69
Vazão de Vapor GV2 (kg/s)	0,49	0,69
Vazão de Vapor GV3 (kg/s)	0,49	0,69
Temperatura Máxima no Revestimento (°C)	599,26	568,00
Velocidade Angular da Bomba 1 (rpm)	2945,62	2970,02
Velocidade Angular da Bomba 2 (rpm)	2940,75	2970,02
Velocidade Angular da Bomba 3 (rpm)	2935,06	2970,02
Potência no Núcleo (KW)	2857,16	2863,99

**Cálculo do transiente:** Os principais resultados experimentais e calculados com o TRAC-PF1 durante a fase transiente do ISP-27 são comparados nas Figs. 6-14. A Tab. 3 apresenta a cronologia dos principais eventos obtida experimentalmente e calculada com o TRAC-PF1.

Dos resultados experimentais das Figs. 6-14 e da Tab. 3, nota-se que o circuito BETHSY encontra-se em condição de estado estacionário quando a ruptura na perna fria 1 ocorre no tempo  $t = 0$  s, levando à uma rápida depressurização do Sistema de Resfriamento do Reator (SRR) (Fig. 6). Com a queda da pressão do sistema, ocorrem os sinais de desligamento do reator e de injeção (SI) para atuação do HPIS, respectivamente, nas pressões de 13,1 MPa e 11,9 MPa. O sinal SI não atua de imediato no circuito primário, devido à falha do HPIS, mas promove o completo isolamento do lado secundário

**Tabela 3. Cronologia dos Principais Eventos Experimentais e Calculados com o TRAC-PF1.**

Evento	valor exp.	valor calc.
Início do Transiente	0 s	0 s
Sinal de Desligamento	41 s	46 s
Sinal do HPIS	54 s	69 s
Início da Queda de Potência	58 s	63 s
Isolamento da Alim. Princ. do GV	59 s	75 s
Conexão da Alim. Aux. do GV	82 s	99 s
Início da Queda Inercial da Bomba	356 s	369 s
Fim da Queda Inercial da Bomba	971 s	865 s
Vapor Puro na Ruptura	1390 s	---
Início do 1º Descobrimto do Núcleo	1830 s	2200 s
Primeira Quebra do Bloqueio Hidráulico no circuito primário	1944 s	2324 s
Início do 2º Descobrimto do Núcleo	2180 s	---
Início da Ação final	2562 s	3400 s
Injeção do Acumulador	2961 s	3770 s
Segunda Quebra do Bloqueio Hidráulico	3040 s	---
Isolamento do Acumulador	3831 s	4760 s
Entrada do LPIS	5177 s	---
Fim dos Cálculos		8883 s
Fim do Experimento	8330 s	

do GV, isto é, o fechamento da água de alimentação principal e da linha de vapor. A partir deste instante, a pressão do secundário é controlada pela válvula de alívio do GV na pressão de 7,03 MPa, até que a ação final ocorre.

No início do transiente, a perda de líquido subresfriado do SRR resulta na depressurização do sistema para níveis que correspondem à pressão de saturação das zonas mais quentes do circuito, isto é, o plenum superior e as pernas quentes. Após 125 s do transiente, vapor começa a ser formado nestas partes do sistema (Fig. 7), mas existe uma vazão de líquido suficiente para manter o núcleo coberto e refrigerado. Com o sistema saturado, pressão e temperatura evoluem conjuntamente e o sistema atua como um pressurizador, diminuindo a velocidade de variação da pressão. O decréscimo da pressão é contínuo, uma vez que uma quantidade de inassa está sendo perdida pelo sistema. Durante os primeiros estágios da depressurização, quando o sistema está cheio de líquido bifásico, a vazão no ponto da ruptura (Fig. 8) (que possui maior quantidade de líquido) não é capaz de remover todo o calor de decaimento. Então, a primeira parte dos processos de depressurização é limitada por considerações de remoção de energia. A pressão do SRR permanece acima do ponto de atuação para a abertura da válvula de alívio do GV, de modo que a energia possa ser removida via GV. Para manter a eficiência dos mecanismos de transferência de calor, a água de alimentação auxiliar do GV é colocada em operação 30 s após a atuação do sinal SI. A esta pressão, controlada pelo balanço de energia, o calor é removido do sistema primário principalmente por circulação bifásica forçada nos GVs, desde que as três bombas do reator ainda estão em operação. Esta condição de operação permanece até que as bombas são desligadas, 300 s após o sinal SI, e a queda inercial das bombas reduz a vazão nos circuitos do reator.

Logo que a qualidade do fluxo de descarga na ruptura caminha para condições de vapor puro, a energia retirada do sistema aumenta até o ponto em que ela excede o calor produzido no núcleo. O circuito primário resfria e, desde que as condições de saturação permanecem, a pressão do primário cai abaixo do valor da pressão do secundário (Figs. 6 e 9). O calor transferido para o lado secundário não é mais necessário, desde que a energia descarregada através da ruptura é suficientemente elevada para retirar o calor gerado no sistema. Isto resulta num decréscimo da pressão no secundário, reduzindo drasticamente a energia transferida através dos tubos do GV e, conseqüentemente, causando um fechamento momentâneo das válvulas de alívio.

Com a parada total das bombas, a 971 s do transiente uma circulação natural ocorre nos circuitos do reator fazendo a mistura bifásica circular pela parte superior dos tubos do GV, retornando ao núcleo via pernas frias.

Logo que a taxa de vazão na ruptura é reduzida pelo decréscimo da pressão no primário, a energia perdida pelo sistema não é mais suficiente para remover todo o calor armazenado no SRR. Em conseqüência, a transferência de calor

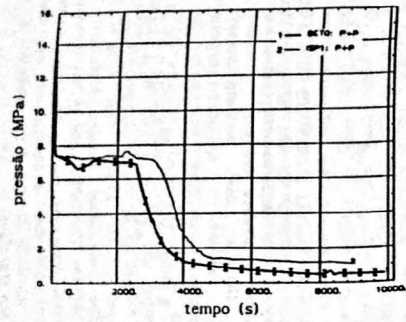


Fig. 6 - Pressão no Topo do Pressurizador.

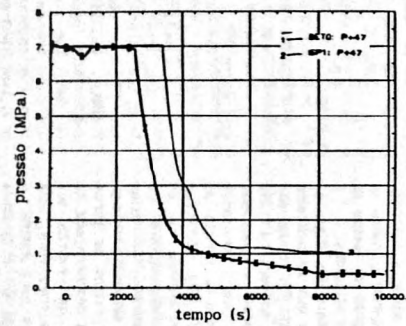


Fig. 9 - Pressão no Lado Secundário do GVI.

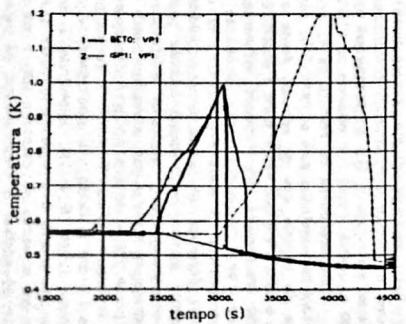


Fig. 12 - Temperatura Máxima no Revestimento.

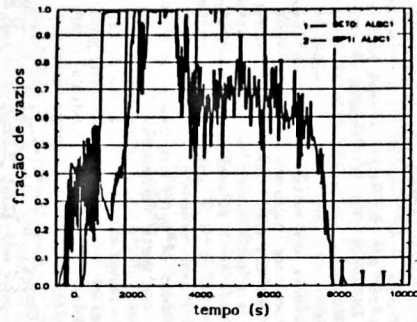


Fig. 7 - Fração de Vazios na Perna Quente 1.

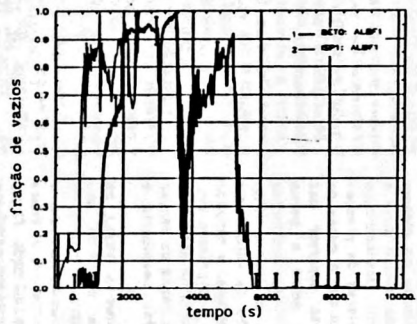


Fig. 10 - Fração de Vazios na Perna Fria 1.

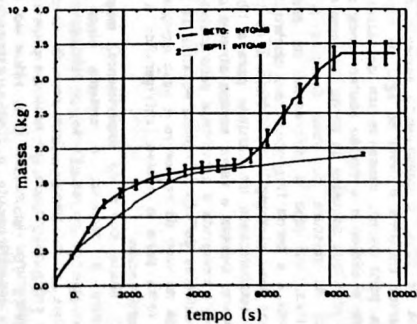


Fig. 13 - Massa de Água Descarregada Através da Ruptura.

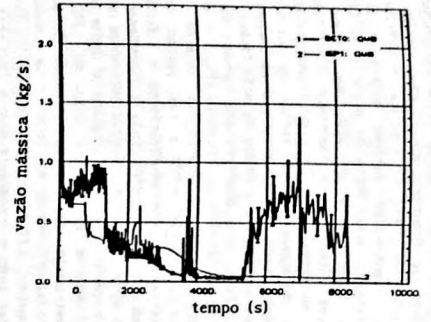


Fig. 8 - Vazão Mássica na Ruptura.

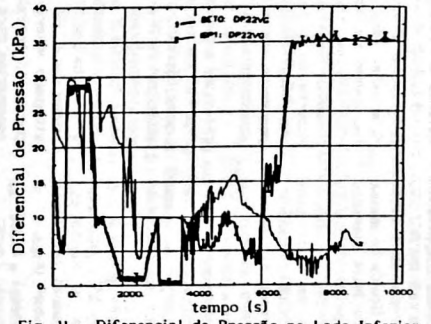


Fig. 11 - Diferencial de Pressão no Lado Inferior da Perna Intermediária do Circuito 2.

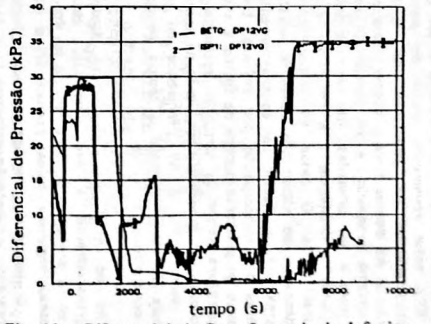


Fig. 14 - Diferencial de Pressão no Lado Inferior da Perna Intermediária do Circuito 1.

pelo GV tem de ser restabelecida e, por esta razão, a pressão no SRR sobe novamente acima do ponto de alívio do GV, reestabelecendo as condições de transferência de calor originais. Ao mesmo tempo, ocorre uma perda líquida de massa do sistema primário, e as partes do circuito mais elevadas começam a ser drenadas, iniciando-se pelo topo dos tubos do GV. Com a drenagem, a retirada de calor por circulação natural cessa. O calor do núcleo é então removido pela condensação do vapor nos tubos do GV. O líquido condensado retorna para o núcleo em contra-corrente através das pernas quentes por condensação por refluxo. Um ligeiro aumento na pressão do primário ocorre de forma a aumentar a diferença de temperatura entre os circuitos primário e secundário, a fim de compensar a menor capacidade de transferência de calor. O lado secundário do GV permanece no ponto de atuação da válvula de alívio durante o tempo de transferência de calor por condensação de vapor.

Quando o nível da mistura bifásica do lado primário cai abaixo do nível do GV, outras áreas do SRR começam progressivamente a ser drenadas, incluindo a região do núcleo. A drenagem do SRR resulta no descobrimento das pernas quentes, seguidas pelas pernas frias do reator (Figs. 7 e 10). O local da ruptura também é descoberto a 1340 s, acarretando a liberação de vapor puro pela ruptura.

Neste estágio do transiente, uma grande quantidade de vapor é gerada pelo calor de decaimento no núcleo. Apesar da ruptura encontrar-se totalmente descoberta, o bloqueio hidráulico ("loop seal"), que existe entre o GV e a bomba nos três circuitos de refrigeração, impede o vapor de escapar do plenum superior, uma vez que a perna intermediária está cheia de água. O consequente aumento da pressão no plenum superior empurra o nível de água da região do núcleo mais e mais para baixo, causando um desbalanceamento manométrico entre o núcleo e a região anular, onde os valores de pressão são próximos daqueles da perna fria com a ruptura. A queda do nível da mistura no vaso descobre a parte superior das varetas, até que o diferencial de pressão entre a perna quente e a perna fria promove a quebra do bloqueio hidráulico ("loop seal clearing") no circuito 2 no tempo de 1944 s (Fig. 11), estabelecendo um caminho para a liberação do vapor pela ruptura. Quando o vapor escapa através da ruptura, a taxa de energia removida é aumentada substancialmente e a pressão cai. A liberação do vapor também equaliza as pressões de entrada e saída do vaso do reator, e a água deslocada é capaz de escoar de volta para o núcleo, refrigerando a região descoberta e superaquecida.

Neste ponto do experimento, mesmo que a vazão na ruptura é pequena, o sistema ainda está perdendo seu inventário de massa. Então, a 2180 s, o nível da mistura do núcleo cai novamente. Este segundo descobrimento do núcleo, não sendo balanceado por nenhuma contra ação, leva à elevadas temperaturas na vareta (Fig. 12) e ao início da ação final. Mais especificamente, a 2562 s, a temperatura do revestimento atinge 450 C e 5 s mais tarde as válvulas de alívio do GV são abertas permitindo a pressão do secundário e, consequentemente, a pressão do primário diminuir. O decréscimo do nível do núcleo é ainda dependente da quantidade de massa drenada pela ruptura até o tempo de 2961 s, quando a injeção do acumulador começa a uma pressão de 4,2 Mpa. Deste ponto em diante, graças também a atuação do LPIS, o nível do núcleo é recuperado completamente, refrigerando as varetas elétricas. O fim do transiente é atingido no tempo de 8330 s, quando condições estáveis do RHRS são atingidas.

Comparando-se os resultados experimentais das Figs. 6-14 com os simulados com o TRAC-PF1, nota-se que na primeira fase do cálculo que se estende desde o início do transiente até o tempo em que vapor puro é descarregado na ruptura (1340 s do transiente), significantes diferenças foram encontradas entre os resultados da simulação e os resultados experimentais. A mais significativa diz respeito a fração de vazios formada na perna fria do circuito 1 (Fig. 10), que aumenta a um tempo de transiente bastante inferior ao do experimento. Este resultado é totalmente discrepante do ocorrido no experimento, visto que neste a formação de vazios na perna fria 1 ocorre devido à drenagem do sistema ao longo do transiente (Figs. 7 e 10). A formação de vazios na perna fria 1 reduz a vazão e a quantidade de massa descarregada na ruptura (Figs. 8 e 13), impedindo a queda da pressão dos sistemas primário e secundário nesta fase do transiente, uma vez que a vazão de descarga não é suficiente para retirar o calor do núcleo. A transferência de calor pelo GV é mantida

durante o transiente nesta fase. A baixa vazão de descarga reduz ainda a velocidade de drenagem do sistema, devido ao progressivo descobrimento do ponto de ruptura, e diminui o diferencial de pressão entre as pernas quente e fria, resultando em uma drenagem mais lenta da perna fria. Estes dois efeitos resultam num atraso de 380s na quebra do bloqueio hidráulico, que diferente do resultado experimental ocorreu no circuito 1 no tempo de 2324 s do transiente (Fig. 14). Isto causou um deslocamento no tempo de todos os processos sucessivos tais como o descobrimento do núcleo, aquecimento das varetas elétricas e o início da ação final.

O início da ação final pela abertura das válvulas do GV reduz as pressões do secundário e do primário (Figs. 9 e 7). Devido à depressurização do primário, a injeção dos acumuladores inicia-se a  $t = 3770$  s nas pernas frias intactas. A injeção de água pelos acumuladores é suficiente para refrigerar o núcleo (fig. 12), mas após o isolamento do acumulador a  $t = 4760$  s, a pressão do sistema permanece acima da pressão obtida no experimento, não atingindo o limite para a entrada do LPIS. Sem a injeção de água do LPIS, a temperatura do revestimento da vareta continua a subir atingindo valores elevados e levando ao término da simulação por erro. Aproximadamente, 237 h de CPU no IBM 4381 foram necessárias para simular todo o transiente com o TRAC-PF1.

## CONCLUSÃO

Os resultados do cálculo pré-teste com o TRAC-PF1 para o ISP-27 foram comparados com os resultados experimentais obtidos no circuito experimental BETHSY. Eles demonstram uma considerável discrepância em relação aos resultados experimentais, que pode ser atribuída a uma inesperada formação de vazios na perna fria do circuito rompido no início do transiente. Isto levou ao deslocamento no tempo dos principais processos envolvidos no transiente e, possivelmente, à diferenças em certas variáveis do circuito, como a elevada temperatura calculada no revestimento da vareta elétrica que é um dos mais indicativos parâmetros do problema. As razões para estas discrepâncias serão avaliadas em cálculos pós-teste, que serão concentrados em modificações nas modelagens do gerador de vapor (que apresentou problemas de convergência no estado estacionário), das bombas de refrigeração e na obtenção de novos coeficientes de perda de pressão na ruptura, em parte responsáveis pela vazão de descarga neste ponto.

## REFERÊNCIAS

- [1] T. Chataing, P. Clement; "BETHSY - Preparatory Workshop for ISP 27 : 2" Cold Leg Break Without HPIS And With Delayed Ultimate Procedure", SETH/LES/90-104, Centre D'etudes Nucleaires de Grenoble, França (1990).
- [2] "BETHSY General Description", SETH/LES/90-97, Centre D'etudes Nucleaires de Grenoble, França (1990).
- [3] D. R. Liles et alii; "TRAC-PF1 - An Advanced Best-Estimate Computer Program for Pressurized Water Reactor Analysis", Safety Code Development Group, Energy Division, Los Alamos National Laboratory, EUA (1981).
- [4] "Selected Results from BETHSY Tests of the BETHSY Break Nozzles (2", 6") Conducted on the Super Moby-Dick Facility", Adendo do SETH/LES/90-104, Centre D'etudes Nucleaires de Grenoble, França (1990).

## ABSTRACT

The results of a blind TRAC-PF1 calculation for a 2" cold leg break transient are compared with those obtained from the experiment defined as International Standard Problem no. 27 and performed on the French PWR integral test facility, BETHSY. The calculation results high-light the satisfactory response of the TRAC-PF1 code in the simulation of most of the phenomena occurring during the slow thermal hydraulic transient, but they show a considerable discrepancy with the experiment, specially in the time evolution of the processes involved in the transient.