

VIII - ENFIR : TE - TH/2

TRANSITÓRIO DE PARADA DE BOMBA

COMISSÃO ORGANIZADORA DO TE - TH/2

Antonio Carlos Barroso  
 Roberto Longo Freitas  
 Valdemir Gutierrez Rodrigues

Propôs-se para o 29 Tema Especial em Termoidráulica para o VIII-ENFIR, um problema de avaliação de um experimento realizado em um circuito termoidráulico de alta pressão e temperatura (CTE-150). O problema consistiu em avaliar um experimento de transitório de parada de bomba para diversas condições de vazão e pressão. Os resultados apresentados pelos participantes mostraram-se satisfatórios, atribuindo-se as divergências aos diferentes modelos teóricos adotados nos códigos computacionais.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação do comportamento de segurança de reatores nucleares de potência passa obrigatoriamente pela utilização de sofisticados códigos computacionais. De modo a aumentar o nível de confiança nos resultados dos cálculos obtidos pelos códigos, a comunidade científica internacional apoia-se no exercício do problema padrão que é estabelecido através de comparação entre resultados experimentais e teórico. Dentro da ótica de validação de programas computacionais, a Comissão Organizadora do VIII ENFIR estabeleceu para o 29 Tema Especial em Termoidráulica (TE/TH-2) avaliar os resultados experimentais do Circuito Térmico Experimental (CTE-150) desenvolvido no Brasil pela Coordenadoria de Projeto Especiais (COPESP) do Ministério da Marinha [1]. A experiência proposta corresponde a um conjunto de transientes de parada de bomba realizados no CTE - 150, executada especialmente para o TE/TH-2, onde foram efetuadas medidas de vazão mássica e diferença de pressão na bomba para diferentes condições de operação [1].

2.1 ESCOLHA DO TE/TH-2 PARA O VIII-ENFIR

O Tema Especial em Termoidráulica para o VIII - ENFIR, consistiu em um conjunto de transitórios de parada de bomba realizados no Circuito Experimental, CTE - 150, da COPESP. Na Figura 2.1 apresenta-se um fluxograma simplificado da configuração do circuito que foi usada na realização dos experimentos.

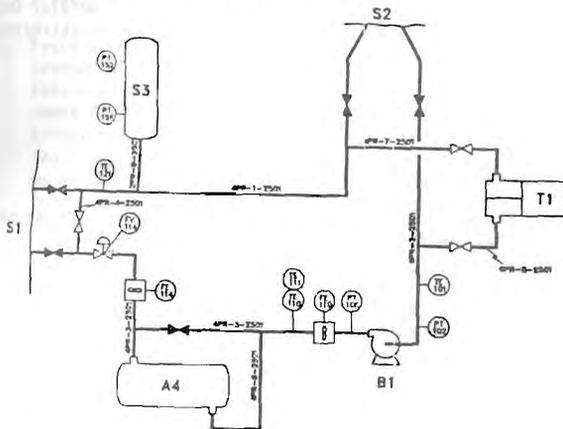


Figura 2.1 Fluxograma simplificado do CTE-150

2.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Foram realizados experimentos de parada de bomba para 2 patamares de pressão do Pressurizador, nominalmente, 50 e 70 bar. Em cada um deles foi executado a mesma sequência de testes e o mesmo número de repetições (cinco). Em todos os casos a potência do aquecedor do pressurizador foi mantido constante, assim como a vazão da água de resfriamento, desta forma as temperaturas do primário não variaram muito, e sua influência nos transitórios em questão foram irrelevantes, sendo estas grandezas registradas apenas para informação.

2.3 OPERAÇÕES PRELIMINARES

No início de cada jornada de operação, após as verificações rotineiras, o CTE-150 é colocado em regime estacionário, com respeito ao balanço térmico, com potência mantida constante em 500kW. Quando os parâmetros de temperatura (indicação gráfica) indicarem que o regime estacionário foi atingido, verifica-se a distribuição dos valores de temperatura (30 pontos) amostrados dentro de um período de 30 minutos, apresenta um desvio padrão de amostra menor que 2% do valor médio. Quando esta condição for satisfeita os procedimentos de testes são iniciados.

2.4 SEQUÊNCIAS DO EXPERIMENTO

- a. Inicialmente o circuito é colocado em regime para as condições estacionárias, determinadas unicamente pela pressão no Pressurizador (p), vazão no primário (w) e potência no aquecedor A4 (P). Verifica-se pelas curvas de tendência se as condições de regime estacionário foram atingidas, impondo-se um critério quantitativo apenas para os valores de vazão. Impõe-se que uma amostra de pelo menos 30 pontos colhidos ao longo de 10 minutos apresente um desvio padrão inferior a 2% do valor médio. Inicia-se então a coleta de dados do estacionário com frequência de amostragem de 0,1 Hz durante 10 minutos.
- b. A partir do estado estacionário atingido em (a), aumenta-se a frequência de amostragem para o máximo disponível (3 Hz) e 40 segundos após, desliga-se a bomba.

A Figura 2.2 ilustra o período de coleta de dados. Na tabela 2.1 indicamos as variáveis que foram amostradas.

- c. Os passos (a) e (b) foram repetidos 4 vezes, obtendo-se 5 conjuntos de dados que correspondem teoricamente as mesmas condições da sequência ideal estacionário-transitório. Quando se repetiu o passo (a) comparou-se

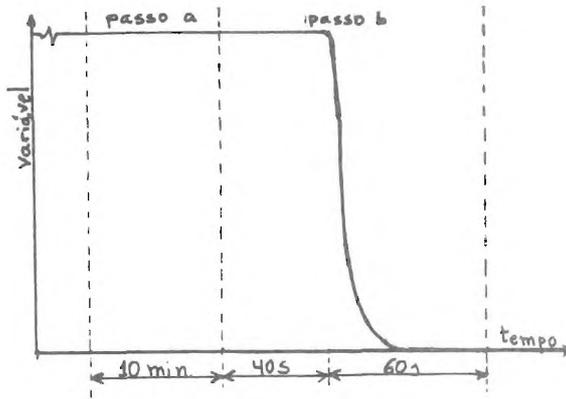


Figura 2.2 Períodos de Coleta de Dados

Tabela 2.2 Designações das Operações

Tabela 2.1 Variáveis Amostradas

VARIÁVEL			ITEM
SIMB	DESCRIÇÃO	LOCAL DE MEDIÇÃO	TAG : SEQ.
w'	Vazão do primário	Descarga da bomba B1	FE 107: a, b
w''	Vazão do primário	Saída do aquecedor A4	FE 114: a, b
p	Pressão do sistema	Pressurizador na região líquida	FE 158: a, b
p <sub>s</sub>	Pressão de sucção	Sucção da bomba B1	PT 102: a, b
p <sub>d</sub>	Pressão de descarga	Descarga da bomba B1	PT 106: a, b
T <sub>q</sub>	Temp. perna quente	Saída do aquecedor A4	TE 121: a
T <sub>f</sub>	Temp. perna fria	Saída do troc calor T1	TE 101: a
C	Contator da bomba		b

a média dos valores da vazão com aqueles da vez anterior prosseguindo-se o teste somente se esta diferença fosse menor do que 1%.

2.5 TABELA DE TESTES

Na Tabela 2.2, foram caracterizadas todas as operações experimentais, que geraram os dados primários. Para facilitar a referência a cada uma dessas operações, foi atribuído um código alfa-numérico, seguindo-se a lógica de um produto cartesiano.

2.6 DADOS FORNECIDOS AOS PARTICIPANTES

Os dados primários obtidos na execução das operações indicadas na Tabela 2.2 foram reduzidos seguindo-se os passos abaixo:

- Cada sequência genérica foi reduzida internamente da seguinte forma:
  - descontou-se dos valores w' e w'' seus valores residuais;
  - definiu-se  $w = (w' + w'') / 2$ ;
  - definiu-se  $D_p = p_d - p_s$ ;
  - descontou-se dos valores de  $D_p$  seu valor residual;
  - definiu-se  $T_m = (T_q + T_f) / 2$ .

PRESSÃO	VAZÃO	SEQUÊNCIAS			
NO PRES-	INICIAL	1		5	
SURIZA-	(tags				
DOR (tag	FE-110 e				
PT-152)	FE-114)	PASSOS		PASSOS	
(bars)	(kg/s)	a	b	a	b
	W1 * 10:	P1W1S1a:	P1W1S1b:	P1W1S5a:	P1W1S5b:
	W2 * 15:	P1W2S1a:	P1W2S1b:	P1W2S5a:	P1W2S5b:
p1 * 50	W3 * 20:	P1W3S1a:	P1W3S1b:	P1W3S5a:	P1W3S5b:
	W4 * 25:	P1W4S1a:	P1W4S1b:	P1W4S5a:	P1W4S5b:
	W5 * 30:	P1W5S1a:	P1W5S1b:	P1W5S5a:	P1W5S5b:
	W1 * 10:	P2W1S1a:	P2W1S1b:	P2W1S5a:	P2W1S5b:
	W2 * 15:	P2W2S1a:	P2W2S1b:	P2W2S5a:	P2W2S5b:
p2 * 70	W3 * 20:	P2W3S1a:	P2W3S1b:	P2W3S5a:	P2W3S5b:
	W4 * 25:	P2W4S1a:	P2W4S1b:	P2W4S5a:	P2W4S5b:
	W5 * 30:	P2W5S1a:	P2W5S1b:	P2W5S5a:	P2W5S5b:

- Reduziu-se as 5 sequências a uma única sequência média para cada caso, utilizando-se o procedimento descrito em 4.1.
- Neste ponto, tem-se em mão 10 conjuntos de dados reduzidos, cada um deles caracterizado por seu código piWj, onde i=1,2 e j=1,...,5. Destes 10 conjuntos deles denominados casos base, foram fornecidos aos participantes para permitir um ajuste do modelo. Dos outros casos, foram escolhidos 2, que se constituiriam no problema padrão do TE/TR-2.

2.7 RESULTADOS SOLICITADOS DOS PARTICIPANTES

Apenas para os casos teste, foi solicitado de cada participante os seguintes dados:

- código do teste;
- tempo de "coast down" a 10% da vazão, definido como tempo decorrido desde o desligamento da bomba até que a vazão caía a 10% do seu valor inicial;
- idem para o "coast down" a 1% da diferença de pressão (Dp);
- histórico temporal da vazão a intervalos de 0,2s, para os 20s seguintes ao desligamento;

- . idem para a diferença de pressão (Dp) na bomba;
- . O tempo de processamento consumido na simulação de cada transitório (os 20s) e o tempo médio gasto por intervalo de integração. Indicar a configuração do sistema computacional usado no processamento.

## 2.8 RESULTADOS DISPONÍVEIS APÓS O EVENTO

Aos participantes interessados, poderemos fornecer com o mesmo detalhamento dos casos-bases, os dados dos casos-teste.

## 3.0 SUMÁRIO DOS CÓDIGOS

Três instituições de pesquisas participaram do TE/TH-2 cujos programas de cálculos utilizados são os seguintes:

Instituição	Programa de cálculo
IPEN/RT/SP	RELAP4/MOD5 [2]
CNEN/DR/RJ	TRAC/PF1 [3]
CDTN/DRT/MG	FLOC [4]

Detalhes específicos sobre o modelo e o código usados na simulação podem ser encontrados nos relatórios individuais listados nas referências bibliográficas.

É importante ressaltar que os códigos empregados na simulação do CTE-150, são intrinsecamente diferentes entre si, visto que o código RELAP4/MOD5 usa a noção de volumes de controle, o código TRAC/PF1 a de componentes enquanto que o código FLOC foi desenvolvido especificamente para avaliar o CTE-150.

## 4.0 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

O sistema de aquisição de dados disponível não permitia a gravação contínua dos sinais, nem o uso de um sinal externo para disparar as amostragens. Desta forma a determinação do instante do desligamento, que deve ser usado como origem, tornou-se problemática. Para se contornar esta dificuldade, usou-se o procedimento que é descrito a seguir, usando-se como exemplo as curvas de vazão:

- Para cada sequência toma-se o trecho do transitório e observa-se o primeiro ponto onde a vazão caiu sensivelmente em relação ao valor estacionário. Provavelmente, toma-se como origem o instante correspondente a abscissa do primeiro ponto considerado e a partir daí translada-se as abscissas dos pontos considerados para esta nova origem. Incluem apenas os pontos com vazão  $\geq 8\% w_0$  (valor estacionário). Note-se que origem arbitrária pode estar afastada do instante real de desligamento em até 0,34s, já que a taxa de amostragem é de 3Hz.
- Feita a operação acima, btem-se 5 conjuntos de pares ordenados, considerados como observações experimentais de 5 curvas  $y_i = f_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, 5$ , supostamente distintas. Caso estas curvas estivessem sincronizadas, ou seja com as abscissas zeradas no instante do desligamento, elas deveriam coincidir, a menos das incertezas experimentais. Isto porque elas representam repetições controladas de um mesmo experimento. A sincronização destas curvas entre si é feita com base num princípio variacional, que exprime matematicamente as afirmações acima. Este funcional é construído da seguinte forma:
  - . Das 5 curvas escolhe-se uma, por ex., aquela cujos dados estão melhores correlacionados, que é definida como referência ou curva base e denotada por  $y_1 = f_1(t)$ .
  - . Propõe-se uma mudança na variável independente do tipo defasagem,  $t = t' - \alpha_i$ , específica para cada curva. Obtem-se, desta forma as curvas transforma-

das  $y_i^* = f(t' - \alpha_i)$ ;  $i = 2, \dots, 5$ .

. Define-se então o funcional,

$$G(\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5) = \sum_{j=2}^5 \int_{t_1}^{t_2} [f_j(t' - \alpha_j) - f_1(t')]^2 dt', \quad (1)$$

que computa o somatório das áreas contidas sob as curvas que representam o quadrado das distâncias pontuais de cada curva transformada ( $y_i^*$ ) em relação a base ( $y_1$ ). A minimização deste funcional fornecerá as defasagens que melhor sincronizam cada curva com a curva base e consequentemente entre si.

. A determinação dos  $\alpha_i$ 's minimizante é feita através da solução do conjunto de equações:

$$\int_{t_1}^{t_2} \left\{ [f_j(t' - \alpha_j) - f_1(t')] f_1'(t') \right\} dt' = 0 \quad (2)$$

$j = 2, \dots, 5$

c. Após efetuar-se as transformações de defasagem, os 5 conjuntos de dados são reunidos num só, que é rearrumado em ordem crescente de abscissa. A este conjunto resultante é ajustada uma nova curva (polinômio de terceiro grau). O instante do desligamento, correspondente a este conjunto de dados sincronizados, é determinado pela interseção da curva ajustada com o valor da variável no regime estacionário ( $w_0$  ou  $\Delta p_0$ ).

d. Finalmente o conjunto de dados é novamente defasado de forma a zerar a abscissa do ponto de desligamento e a este conjunto final é ajustada a curva que representará o valor experimental. Na Figura 4.1 mostra-se o resultado deste procedimento para a vazão no caso PW5.

## 4.2 DEFINIÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO

### 4.2.1 INDICADORES DE PRECISÃO

No que tange às estimativas dos maiores erros de cada simulação, serão usadas as quantidades definidas abaixo:

. Máximo desvio absoluto (M.D.A. ou E)

$$E_{xi} = \max \left[ \left| f_{xi} - f_{xe} \right| \right] \quad 0 \leq t \leq t_0$$

onde: x = w, p refere-se respectivamente à vazão ou à diferença de pressão na bomba.

$f_{xi}$  = curva calculada pelo i-ésimo participante

$f_{xe}$  = curva experimental

$t_0$  = abscissa do último ponto considerado na curva experimental após o desligamento.

. Máximo desvio relativo

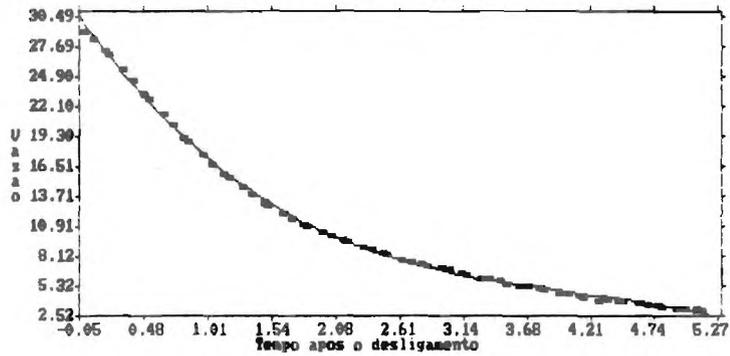
$$e_{xi} = \max \left[ \left| \frac{f_{xi} - f_{xe}}{f_{xe}} \right| \right] \quad 0 \leq t \leq t_0$$

Uma avaliação mais global, de como uma dada curva simulada aproxima a curva experimental, será feita com auxílio dos indicadores abaixo:

. Desvio relativo médio (D.R.M. ou  $\bar{e}$ )

$$\bar{e}_{xi} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} e_{xi} dt$$

Fig. 4.1 - P1M5 Vazão / Polin. Ajustado



. Desvio relativo quadrático médio (D.R.Q.M. ou  $\langle e \rangle$ )

$$\langle e_{xi} \rangle = \left[ \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} e_{xi}^2 dt \right]^{1/2}$$

Este último indicador é o que melhor mede o afastamento relativo entre a curva simulada e a curva experimental, contudo não dá nenhuma informação quanto a posição relativa das curvas. O D.R.M. além de medir o afastamento, traz alguma informação quanto ao posicionamento entre elas, contudo o seu valor pode ser afetado pelo cancelamento de desvios.

Os índices DRM e DRQM devem ser usados em conjunto, observando-se que quanto mais próximos os dois estiverem em magnitude, mais confiável será a informação contida no DRM.

#### 4.2.2 INDICADORES DE DESEMPENHO COMPUTACIONAL

Tendo em vista a diversidade dos códigos, modelos e ambientes de processamento utilizados, não serão definidos indicadores quantitativos para esta avaliação. Ainda assim, alguns comentários sobre o assunto serão feitos na seção 4.5.

#### 4.3 CURVAS TÍPICAS

Nesta seção serão apresentados alguns gráficos, que servirão de auxílio para se comparar o comportamento das simulações dos participantes em relação às curvas experimentais.

Apenas três grupos, representado IPEN, CNEN-RJ e CDTN entregaram seus resultados. Isto permitiu que, para cada grandeza e cada caso teste, se pudesse reunir na mesma figura a curva experimental e as curvas dos três participantes, sem se sobrecarregar o gráfico. Os resultados do caso teste P1W4, para vazão, diferença de pressão e seus respectivos desvios relativos em relação aos valores experimentais são mostrados nas figuras 4.2 a 4.5. Curvas análogas, relativas ao caso teste P1W5 são reunidas nas figuras 4.6 a 4.9.

Por absoluta falta de tempo, deixou-se de incluir os resultados do teste P2W2, além de se julgar que estes não trariam nenhuma novidade para as análises subsequentes.

A partir das curvas experimentais calculou-se os tempos de "coast down" a 10% para a vazão e a 1% para a diferença de pressão. Os resultados encontrados são mostrados a seguir:

	P1W4	P1W5
Vazão 10% (s)	5,0335	5,0876
Dp 1%(s)	4,9387	5,0383

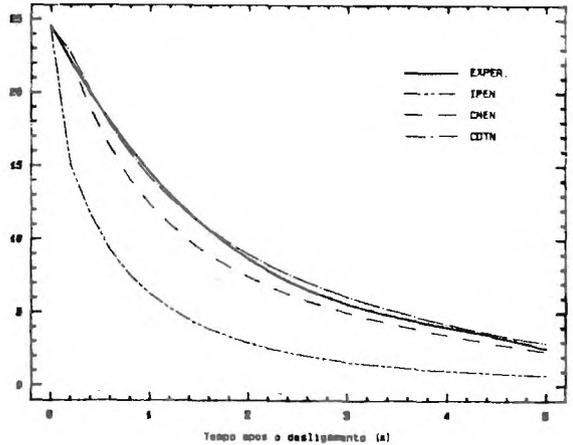


Figura 4.2 : P1W4 Vazão (kg/s)

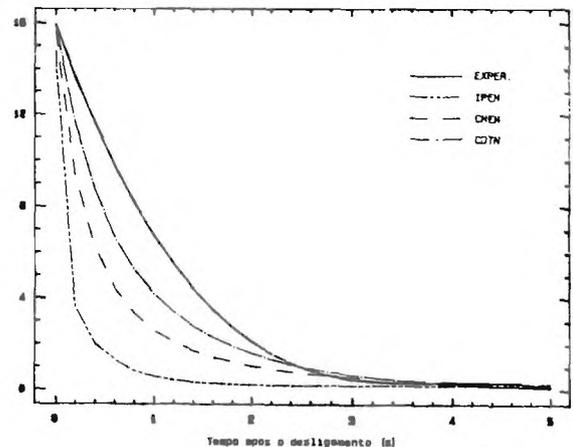


Figura 4.3 : P1W4 DP na Bomba (bar)

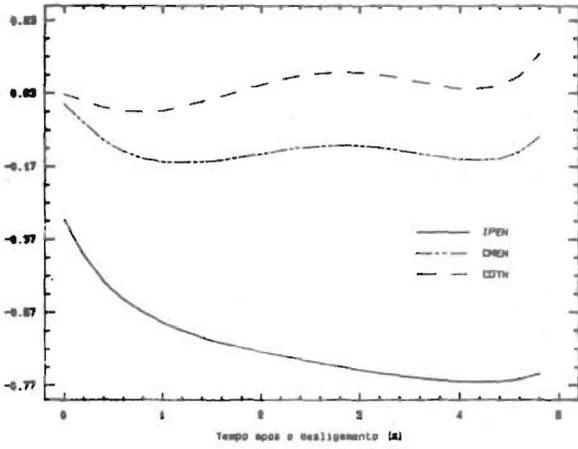


Figura 4.4 : P1W4 Devs. Rel. na Vazão (pu)

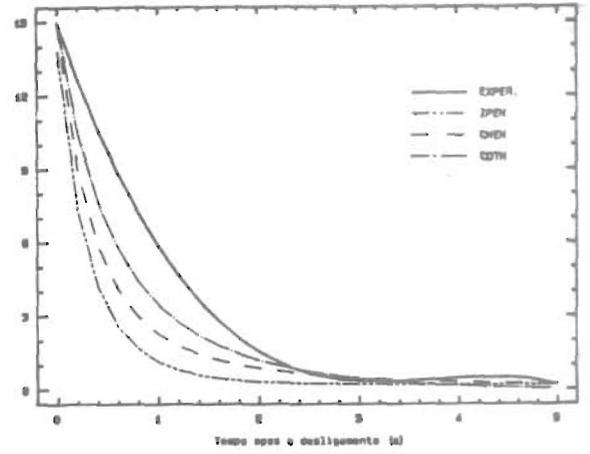


Figura 4.7 : P1W5 DP na Bomba (bar)

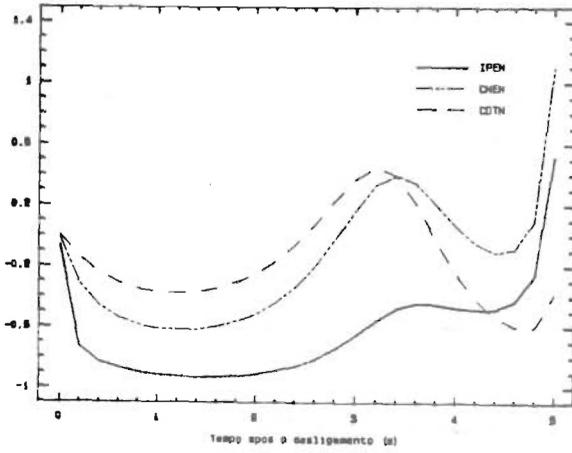


Figura 4.5 : P1W4 Devs. Rel. na DP (pu)

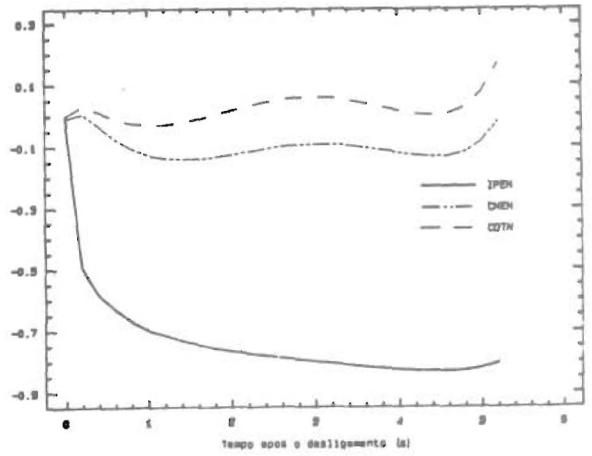


Figura 4.8 : P1W5 Devs. Rel. na Vazão (pu)

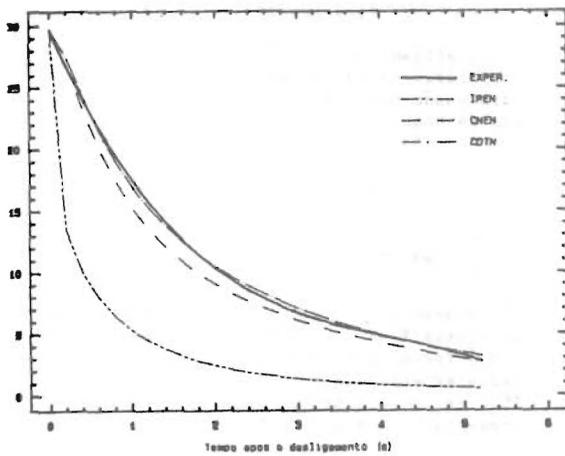


Figura 4.6 : P1W5 Vazão (kg/s)

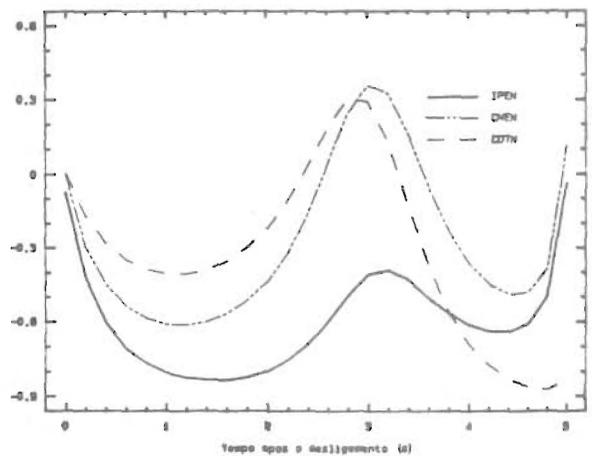


Figura 4.9 : P1W5 Devs. Rel. na DP (pu)

#### 4.4 TABELAS DE DESEMPENHO

Lançando mão dos indicadores definidos em 4.2, pode-se formar a seguinte tabela:

Tabela 4.1 Indicadores de Desempenho

TESTE	VARIÁVEL	PARTICIPANTE	MDA kg/s/bar	M.D.R. %	D.R.M. %	D.R.Q.M. %
P 1 W 4	w	IPEN	- 8,73	76,23	63,92	66,04
		CNEN	- 2,20	16,32	12,51	13,11
		CDTN	0,60	13,61	3,84	5,45
	$\Delta p$	IPEN	-10,00	-93,29	-66,65	72,38
		CNEN	5,36	109,89	-18,48	42,60
		CDTN	- 3,09	-60,45	-17,18	34,62
P 1 W 5	w	IPEN	-14,11	-83,26	-74,58	75,75
		CNEN	- 2,25	-14,31	-10,36	11,01
		CDTN	0,81	16,92	2,03	4,17
	$\Delta p$	IPEN	- 6,43	-83,57	-61,35	63,99
		CNEN	- 4,77	-61,52	-28,14	41,47
		CDTN	- 3,09	-87,53	-32,10	46,91

Comparando-se os tempos de "coast down" calculados pelos participantes com os obtidos a partir dos dados experimentais, monta-se uma tabela com os erros relativos.

Tabela 4.2 Erros no Tempo de "Coast down"

CASO	$\Delta \bar{t} / \bar{t}$	IPEN	CNEN	CDTN
P 1 W 4	$\bar{t}$ 10% w	-54,31%	- 1,86%	7,48%
	$\bar{t}$ 1% $\Delta p$	-47,35%	42,95%	-11,52%
P 1 W 5	$\bar{t}$ 10% w	-65,58%	2,05%	- 5,94%
	$\bar{t}$ 1% $\Delta p$	-24,58%	32,78%	20,61%

#### 4.5 ANÁLISE DAS COMPARAÇÕES

A comparação teórica-experimental do CTE-150, apresentada nas figuras 4.2 e 4.3 para o caso teste PIW4 e nas figuras 4.6 e 4.7 para o caso teste PIW5, foi baseado nos resultados oriundos da simulação apresentada nas referências [ 2 , 4 ]. Em função disto, as seguintes observações podem ser feitas:

- qualitativamente, os códigos avaliaram de forma satisfatória os dados experimentais do CTE-150, tanto para vazão mássica quanto para a diferença de pressão na bomba;
- os possíveis desvios causados pelos códigos relativamente aos dados experimentais podem ser atribuídos a duas razões principais: modelos físicos de dinâmica de fluidos e modelos de dinâmica da bomba diferentes entre si;
- observa-se que os resultados de vazão mássica para os testes PIW4 e PIW5 apresentados pelo código FLOC [ 4 ] foram os mais representativos comparados aos dados experimentais. Isto se deve ao fato do código FLOC ter sido desenvolvido especificamente para representar a bomba do CTE-150;
- por outro lado, a simulação efetuada com o código TRAC/PP1 [ 3 ] utilizam as curvas homólogas referentes ao Circuito Semiscale guardando a similaridade de com a velocidade específica da bomba do CTE-150;

- . para os cálculos teóricos da perda de pressão na bomba, os códigos quantitativamente não representaram de forma satisfatória os dados experimentais, a exceção do final do transiente. Esta discrepância pode ser atribuída a falta de informações mais exatas sobre as curvas características da bomba do CTE-150;
- . os códigos RELAP4/MOD5 [ 2 ] e TRAC/PF1 [ 3 ], subestimaram sistematicamente os resultados experimentais de vazão mássica e perda de pressão na bomba do CTE-150.

## 5.0 CONCLUSÕES E RECOMBNDações

A importância do exercício do TE/TH-2 é de fundamental relevância para a avaliação dos problemas existentes na área de termodrúlica, tanto do ponto de vista teórico quanto do desenvolvimento experimental.

Observa-se deste exercício que os códigos computacionais simularam qualitativamente bem os transientes de parada de bomba no CTE-150. Entretanto, um aprimoramento mais detalhado dos fenômenos envolvidos deve ser feito de modo a representar mais realisticamente, do ponto de vista quantitativo o transiente proposto.

Tendo em vista a contribuição que este exercício proporcionará a comunidade científica do TE/TH-2, a Comissão Organizadora do VIII ENFIR propõe a continuidade de deste trabalho e sugere uma abordagem mais ampla, conforme citado a seguir:

- a. Passar a realizar o TE/TH anualmente, coincidindo com o ENFIR nos anos ímpares e com o CGEN nos anos pares.
- b. Criar, talvez no âmbito da ABEN, uma comissão para cuidar do planejamento de longo prazo e definição de um programa de experimentos para a geração de problemas padrão para os próximos TE/TH's.
- c. Criar uma comissão encarregada de redigir normas que balizem a definição, elaboração de rotinas, execução e documentação de experimentos e aquisição dos dados que servirão de base para os problemas padrão.
- d. Motivar a participação institucional nos TE/TH's, principalmente as do âmbito governamental. Espera-se obter colaboração de cunho oficial com alocação de mão de obra, utilização de bancadas experimentais, etc... .

## 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] "2º Tema Especial em Termodrúlica- TE/TH-2 Especificação do Problema e Diretrizes aos Participantes". Comissão Organizadora do VIII ENFIR, 1990.
- [2] CONTI, T.N e SABUNDJIAN, G.; "TE/TH-2: Resultados do Grupo do IPEN/CNEN-SP". VIII ENFIR, Setembro de 1991, Atibaia, SP - Brasil
- [3] MADEIRA, A.A.; PONTEDEIRO, A.C.; DOMINGUEZ, L.M.F.; GALETTI, M.R. S. e BORGES, R.C.; "TE/TH-2: Resultados do Grupo da CNEN/RJ". ; VIII ENFIR, Setembro de 1991, Atibaia, SP-Brasil.
- [4] VELOSO, M.A. e SIRIMARCO, L.F.; "TE/TH-2: Resultados do Grupo do CDTN/CNEN". ; VIII ENFIR, Setembro de 1991, Atibaia, SP-Brasil.

## AGRADECIMENTO

A Comissão Organizadora do TEMA ESPECIAL em Termodrúlica do VIII ENFIR deseja expressar seu agradecimento a COPESP, na pessoa do seu Presidente Vice-Almirante(EN) Othon Luiz Pinheiro da Silva pelas facilidades proporcionadas durante a execução deste trabalho.