

ST6-E

UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA RELAP4 NO CIRCUITO EXPERIMENTAL DE ÁGUA  
DO IPEN

GAIANE SABUNDJIAN

Divisão de Termodinâmica e Termo-Hidráulica  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
São Paulo, SP

SUMÁRIO

Para uma maior segurança das centrais nucleares e da população em geral, foram desenvolvidos códigos de termo-hidráulica para análise de acidentes.

Dentre todos os códigos, o RELAP4, desenvolvido pela Aerojet Nuclear Company do Laboratório de Engenharia de Idaho Falls-EUA, tem sido o mais utilizado devido, principalmente, ao fato de estar disponível ao público. Este código apresenta resultados satisfatórios quando utilizados na resolução dos mais diversos tipos de problemas.

Basicamente, este trabalho tem por objetivo analisar e comparar as versões MOD3 e MOD5 do programa RELAP4, através da simulação do comportamento do Circuito Experimental de Água (C.E.A.) do IPEN, tanto no estado estacionário como sob condições de acidentes.

Embora o C.E.A. tenha sido construído para simular o funcionamento de reatores do tipo PWR e BWR, neste trabalho os testes foram feitos apenas para o circuito PWR.

Através da análise dos resultados encontrados neste trabalho, concluímos que a modelagem adaptada para o C.E.A., nas simulações feitas pelo código RELAP4, (versões MOD3 e MOD5), mostrou-se satisfatória. Os acidentes simulados revelaram que o C.E.A. pode suportar situações de acidentes, desde que os sistemas de emergência atuem. Através de comparação feita entre as duas versões do RELAP4, mostramos que os resultados encontrados para a versão MOD5 traduzem melhor as estimativas reais.

## 1. Introdução

O núcleo de um reator em operação contém uma vasta quantidade de material altamente radioativo, e tendo em vista a possibilidade da liberação desta radioatividade para o meio ambiente, viu-se a necessidade de se aplicar normas rígidas de segurança à usina nuclear a fim de proteger o público. A fim de podermos ter uma melhor compreensão do comportamento de uma usina, sob condições de acidente, foram feitas algumas simulações de transientes com o C.E.A., utilizando-se para isto um código de análise de acidentes (RELAP4).

O objetivo principal deste trabalho é o de realizar uma análise termo-hidráulica do C.E.A., no estado estacionário, e sob condições de acidente como: parada de bomba com o desligamento da seção de testes, parada de bomba com desligamento da seção de testes através do protetor de subvazão e parada de bomba sem desligamento da seção de testes. Na simulação desses acidentes foi utilizado o programa RELAP4 - versões MOD5 [1] e MOD5 [2].

O código RELAP4 tem sido o mais utilizado em análise de acidentes, por se encontrar disponível e por apresentar resultados satisfatórios, quando usado na solução dos mais diversos tipos de problemas. Isto foi verificado quando se fez a comparação, entre os dados experimentais obtidos de um tipo de Acidente de Perda de Refrigerante Primário - APRP (LOCA) e o código RELAP4 [3].

## 2. O Circuito Experimental de Água do IPEN

O princípio de funcionamento do C.E.A. é mostrado esquematicamente na figura 1, e possui as seguintes características na seção de testes [4].

- Pressão de operação = 70 bar
- Temperatura na saída da seção de testes = 285°C
- Temperatura na entrada da seção de testes = 256°C
- Vazão volumétrica na seção de testes = 20 l/s
- Potência na seção de testes = 1600 kw
- Comprimento da seção de testes = 3600 mm

O C.E.A. possibilita a realização de experimentos termo-hidráulicos em escoamento monofásico ou bifásico e tem por objetivos principais os seguintes:

- i) simulação de varetas combustíveis através de elementos elétricos aquecidos para estudos de transferência de calor;
- ii) medição de parâmetros termo-hidráulicos de interesse no projeto e análise de reatores à água leve;

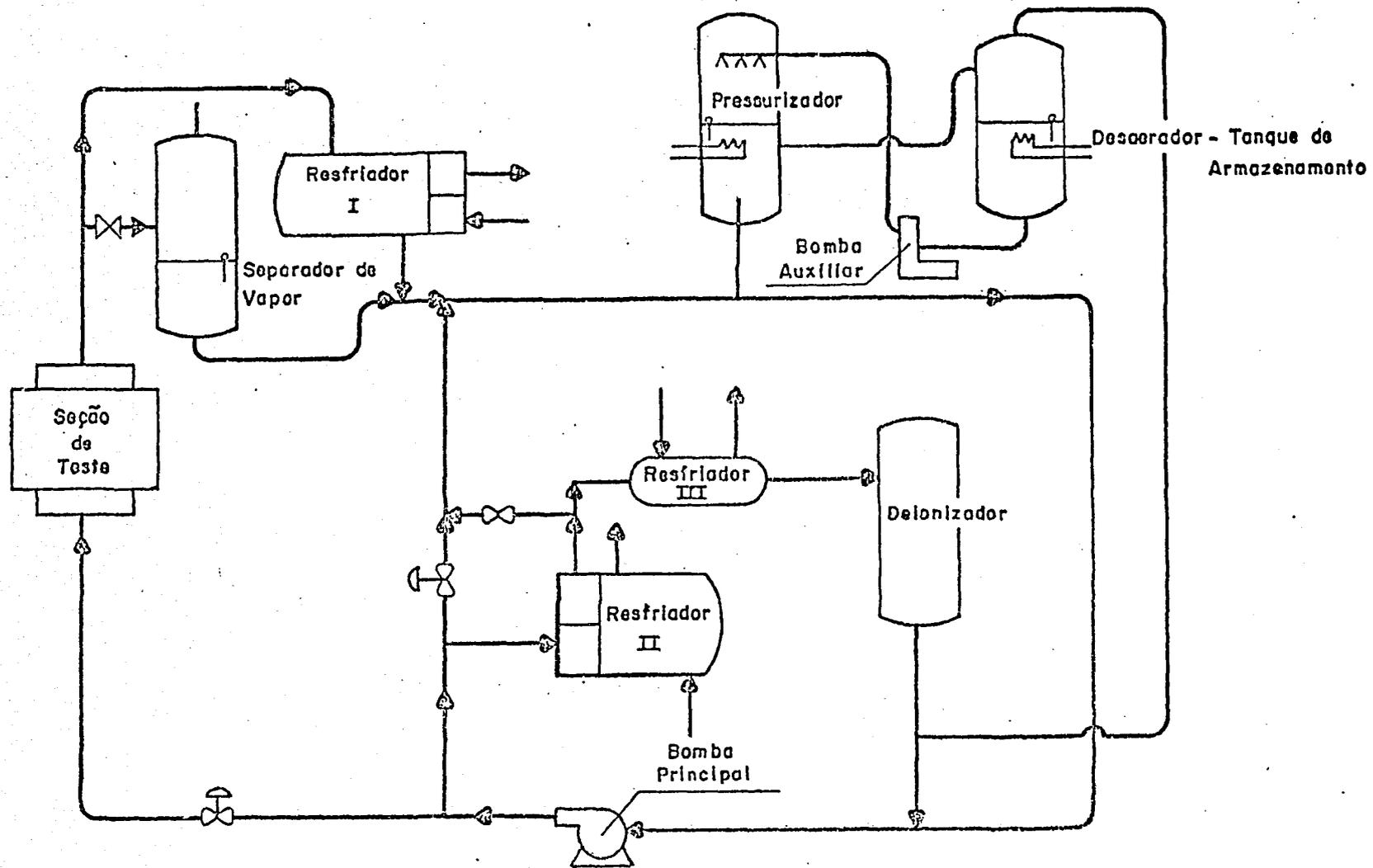


Figura 1 - Esquema do Circuito Experimental de Água do C.E.A.

- iii) desenvolvimento e ensaio de modelos analíticos para códigos de computação na análise do desempenho de elementos combustíveis; e
- iv) estudo de perda de pressão em elementos combustíveis

### 3. Descrição do Programa RELAP4

O programa computacional RELAP4 é bastante complexo. Sua estrutura consta de 197 subrotinas com um total de 45.000 cartões escritos em FORTRAN IV. Este código é unidimensional e foi escrito principalmente para descrever o comportamento transitório termo-hidráulico de reatores nucleares refrigerados à água, sujeitos a acidentes postulados tais como os resultantes de perda de refrigerante e parada de bomba.

Os conjuntos principais de equação resolvidas pelo programa RELAP4 são:

- a) equações do fluido;
- b) equações de transferência de calor;
- c) equações de cinética do reator.

O RELAP4 calcula, a cada iteração, as condições do fluido tais como vazão, pressão, temperatura e título, as condições térmicas no interior dos materiais sólidos tais como perfis de temperatura e potência, e as condições nas interfaces líquido-sólido, como os fluxos de calor e temperatura de superfície.

#### 3.1. Diferenças entre o RELAP4/MOD5 e o RELAP4/MOD3

O RELAP4/MOD5 faz parte de uma série, desenvolvida para descrever as condições termo-hidráulicas referentes a transitórios postulados nos sistemas de reatores à água leve. O RELAP4/MOD5 incorpora vários melhoramentos e modificações feitas sobre o RELAP4/MOD3. Estas modificações e melhoramentos incluem o seguinte:

- modelos de escoamento crítico adicionais;
- modelo de equilíbrio homogêneo de Henry-Fauke;
- cálculo de pressões de estagnação (para uso com modelo de cálculo de escoamento crítico);
- modelo para avaliar a penetração de água do 'downcomer': modelo de Wallis e Wallis-Crowley e modelo baseado nos testes de vaso em escala 1/15 de Battelle-Columbus;
- modelo de arrastamento de água do 'plano inferior';

- transferência de calor: a) correlação modificada de Bromley (baixa qualidade, baixo escoamento e pós-fluxo crítico de calor); b) convecção natural e radiação (alta qualidade, baixo fluxo de escoamento e pós-fluxo crítico de calor); c) correlação de Berenson para ebulição por filme e d) disponibilidade para modelar várias placas condutoras de calor por elemento de volume;
- modelos de escoamento vertical e horizontal;
- modelos de escoamento de ar;
- modelos para evitar instabilidade devido a mudança sobre uso de modelos compressíveis/imcompressíveis.

#### 4. Modelo Utilizado

Com a finalidade de enquadrar o C.E.A. dentro da filosofia de utilização' do programa RELAP4, e com o intuito de reduzir o tempo de computação e a área de memória, otimizando desta forma o processamento, foram eliminados do circuito original alguns de seus componentes.

Embora o C.E.A. possa representar os circuitos PWR e BWR, as simulações com o código RELAP4 foram feitas apenas para o circuito PWR. Na modelagem feita foram eliminados os seguintes componentes do circuito original: o separador de vapor (este componente não é utilizado no circuito PWR), o tanque armazenador, desaerador, pois é usado na fase de preparação da água, e seu funcionamento se dá quando ocorre o fornecimento ocasional de água ao pressurizador. Desta forma, o armazenador-desaerador não influencia consideravelmente o funcionamento do circuito, para as simulações analisadas. Um dos resfriadores (III) e deionizador não entrarão no modelo, pois não afetam significativamente as condições no estado estacionário e nos casos de transientes. Portanto, a modelagem foi feita de forma a não comprometer a representação realística do funcionamento do circuito termo-hidráulico, cujo esquema original pode ser visto através da figura 2.

O esquema por nós adotado para a modelagem do C.E.A., conforme figura 3, é dotado de um conjunto de 19 volumes, 22 junções e 7 placas de calor [5]. Para se chegar a esta conclusão foram feitas uma série de testes de modelos mais simples e mais detalhados até se obter um modelo que apresenta uma convergência razoável e menor tempo de computação.

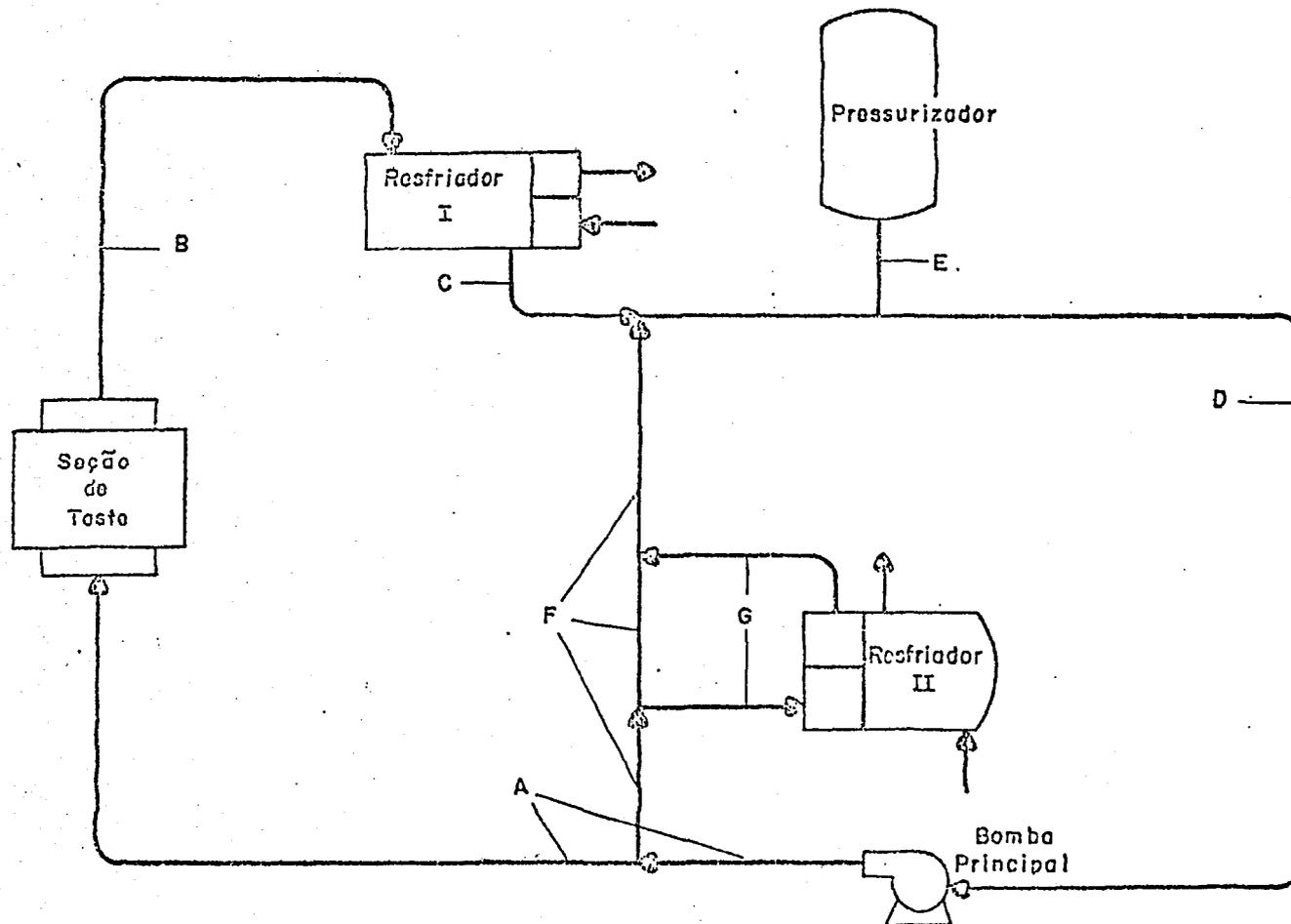


Figura 2 - Circuito Utilizado na Modelagem



## 5. Simulações Realizadas

### 5.1. Estado Estacionário

Inicialmente, foi feita a simulação no estado estacionário, para podermos distinguir a situação de operação normal do C.E.A. e o caso de um transiente propriamente dito.

Os resultados obtidos desta simulação, com o código RELAP4 podem ser vistos comparativamente na seção seguinte na forma de gráficos para uma melhor análise de seus comportamentos. Para isso, utilizou-se o programa S.A.S. (Statistical Analysis System) [6].

As saídas do programa RELAP4 estão limitadas em apenas nove variáveis de edição em relação ao tempo. Desta forma, foram escolhidas as variáveis de maior significado. As simulações feitas foram até 100 segundos, pois a partir deste valor as variações dos parâmetros são praticamente desprezíveis (~ 0,3%).

### 5.2. Transientes

O termo transiente denota um desbalanceamento entre a quantidade de calor sendo produzido no núcleo e a taxa de remoção de calor por parte do refrigerante. Obviamente, a situação a ser evitada é aquela que causa superaquecimento do combustível, isto é, a taxa de geração de calor supera a taxa de remoção de calor.

#### 5.2.1. Transiente 1 - Parada de Bomba com Desligamento da Seção de Testes

Neste caso, foi considerada uma falha do funcionamento normal da bomba, por causa de um mal funcionamento do motor da bomba ou devido ao desligamento da tensão de alimentação. Uma vez desligada a bomba, o sistema de segurança da seção de testes é acionado automaticamente, desligando-a em 0,2 segundos. Este atraso é devido à inércia dos diversos componentes do sistema.

#### 5.2.2. Transiente 2 - Parada de Bomba com o Desligamento de Seção de Testes Através do Protetor de Subvazão

Para a realização deste evento, foi suposta a possibilidade de uma falha no sistema de segurança da seção de testes, o qual deveria desligar a geração de potência logo após 0,2 segundos o desligamento da bomba. Assim, a potência só será cortada pela ação de outro sistema de proteção, acionado quando a vazão de massa na seção de testes for menor que 10 lbm/s. Durante um tempo a geração de

potência continua sem que haja uma circulação normal de água (somente há uma pequena circulação devida à inércia da bomba).

### 5.2.3. Transiente 3 - Parada de Bomba sem Desligamento da Seção de Testes

Neste caso, foi simulada a parada de bomba e foi suposto que nenhum sistema de proteção é acionado. É difícil estimar a probabilidade de ocorrer essa sequência de falhas no sistema de segurança, uma vez que não estão disponíveis as informações básicas sobre as características dos componentes do C.E.A. . Mas é de interesse fazermos este tipo de análise para termos uma noção do que aconteceria em tais circunstâncias. Pelo fato da vazão do refrigerante através do elemento aquecido diminuir, devido a parada de bomba, e como a potência gerada na seção de testes não é cortada, ocorre o caso limite em que o fluxo crítico é atingido no elemento aquecido. A maior preocupação nesta análise é saber as condições do fluxo superficial nas placas de calor e que podem ocasionar o 'burn-out', ou seja, a fusão do elemento aquecido.

## 6. Análise dos Resultados

Nesta análise são apresentados alguns exemplos significativos, lembrando, entretanto, que não temos espaço suficiente para apresentar todos os resultados obtidos.

No estado estacionário, os resultados alcançados com a versão RELAP4/MOD5 são bem próximos daqueles obtidos com a versão RELAP4/MOD3 [5] como mostra a figura 4.

No caso do transiente 1, verificamos por meio da figura 5 que a temperatura no volume 5 cai bruscamente em alguns segundos, isto porque a potência na seção de testes é cortada em um certo tempo relativamente pequeno, e a temperatura do sistema tende a um valor de equilíbrio próxima da temperatura da água na saída da bomba. A queda de pressão na seção de testes é vista na figura 6, a qual decai suavemente com tempo.

Para o caso do transiente 2 os parâmetros considerados são as temperaturas no volume 5 e na superfície da placa 3 (parte superior do elemento aquecido na seção de testes). Verificamos por meio das figuras 7 e 8 que as temperaturas sobem linearmente e quando a potência é cortada as temperaturas começam a diminuir.

Como podemos verificar através da figura 9, no caso do transiente 3, observamos que a temperatura da água no volume 5 sobe constantemente, sofrendo uma elevação brusca aos 36 segundos.

PLOT OF Y2\*X      SYMBOL USED IS \* MOD3  
PLOT OF Y3\*X      SYMBOL USED IS + MOD5

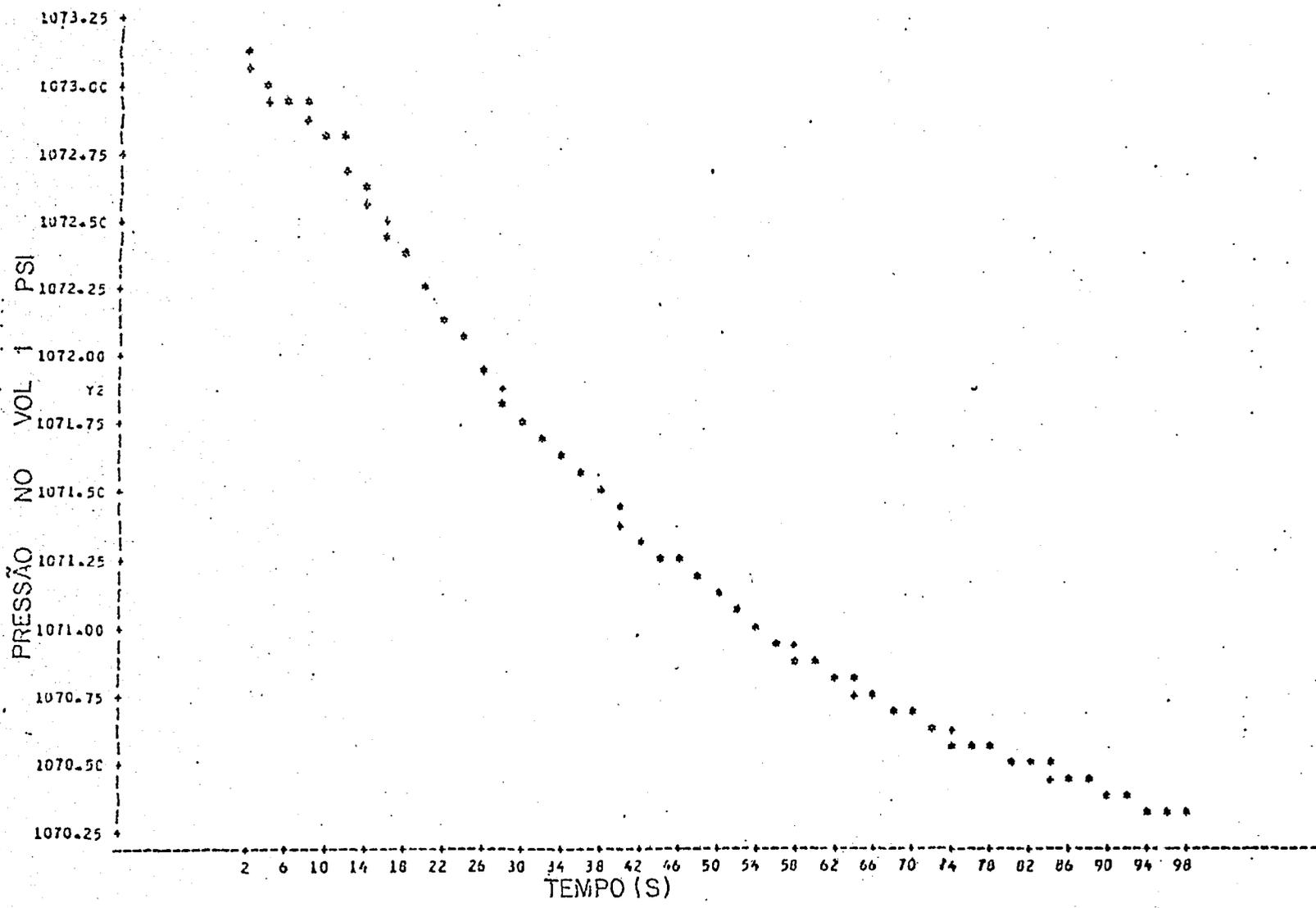


Figura 4 - Pressão Média na Bomba.

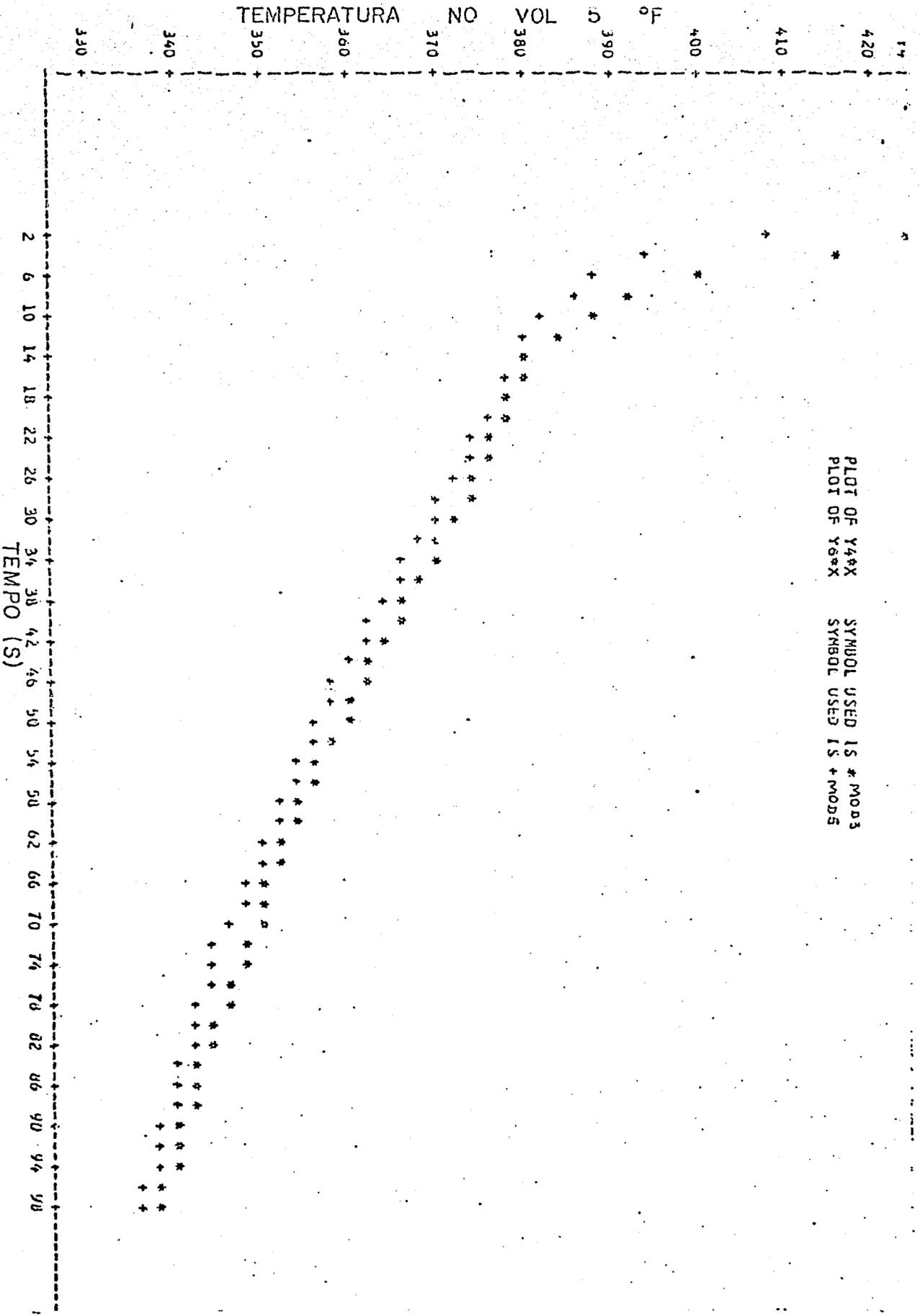


Figura 5 - Temperatura média na seção de testes.

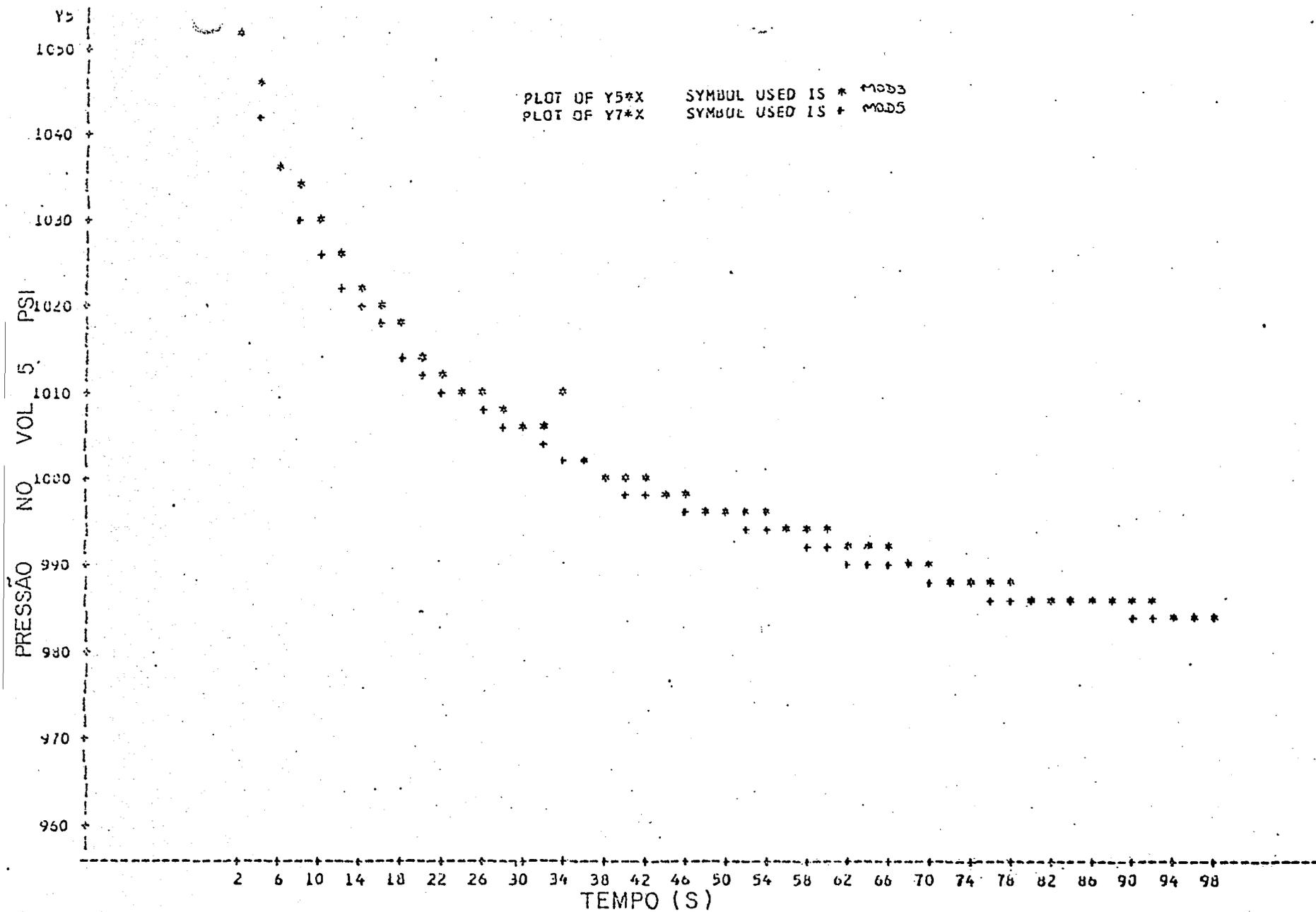


Figura 6 - Pressão Média na Seção de Testes

PLOT OF Y\*X      SYMBOL USED IS \* MOD3  
PLOT OF Y2\*X     SYMBOL USED IS + MOD5

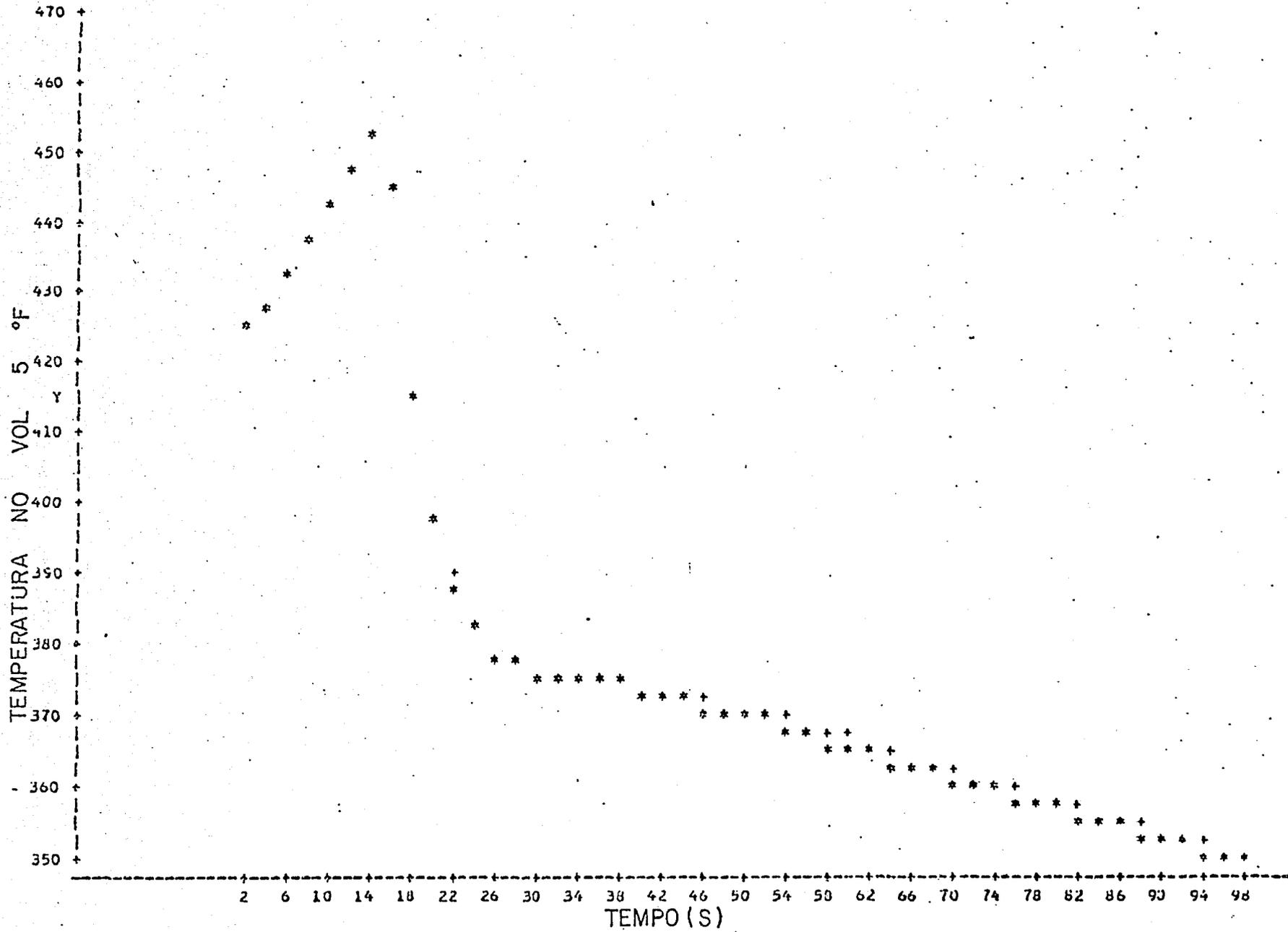


Figura 7 - Temperatura Média na Seção de Testes.

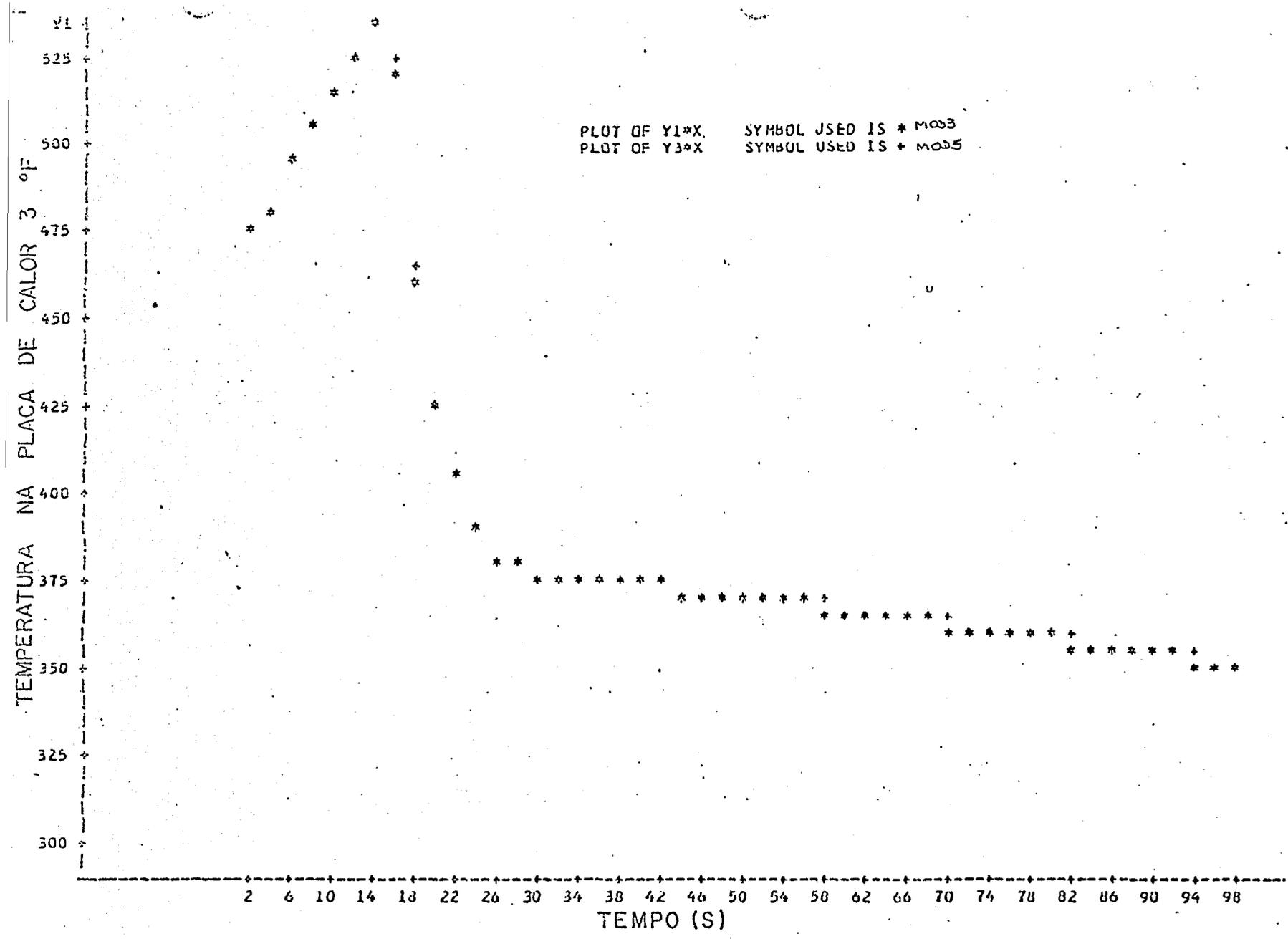


Figura 8 - Temperatura na Superfície do Elemento Aquecido na saída da Seção de Testes.

PLOT OF Y\*X SYMBOL USED IS \* MOD 3  
PLOT OF Y2\*X SYMBOL USED IS \* MOD 5

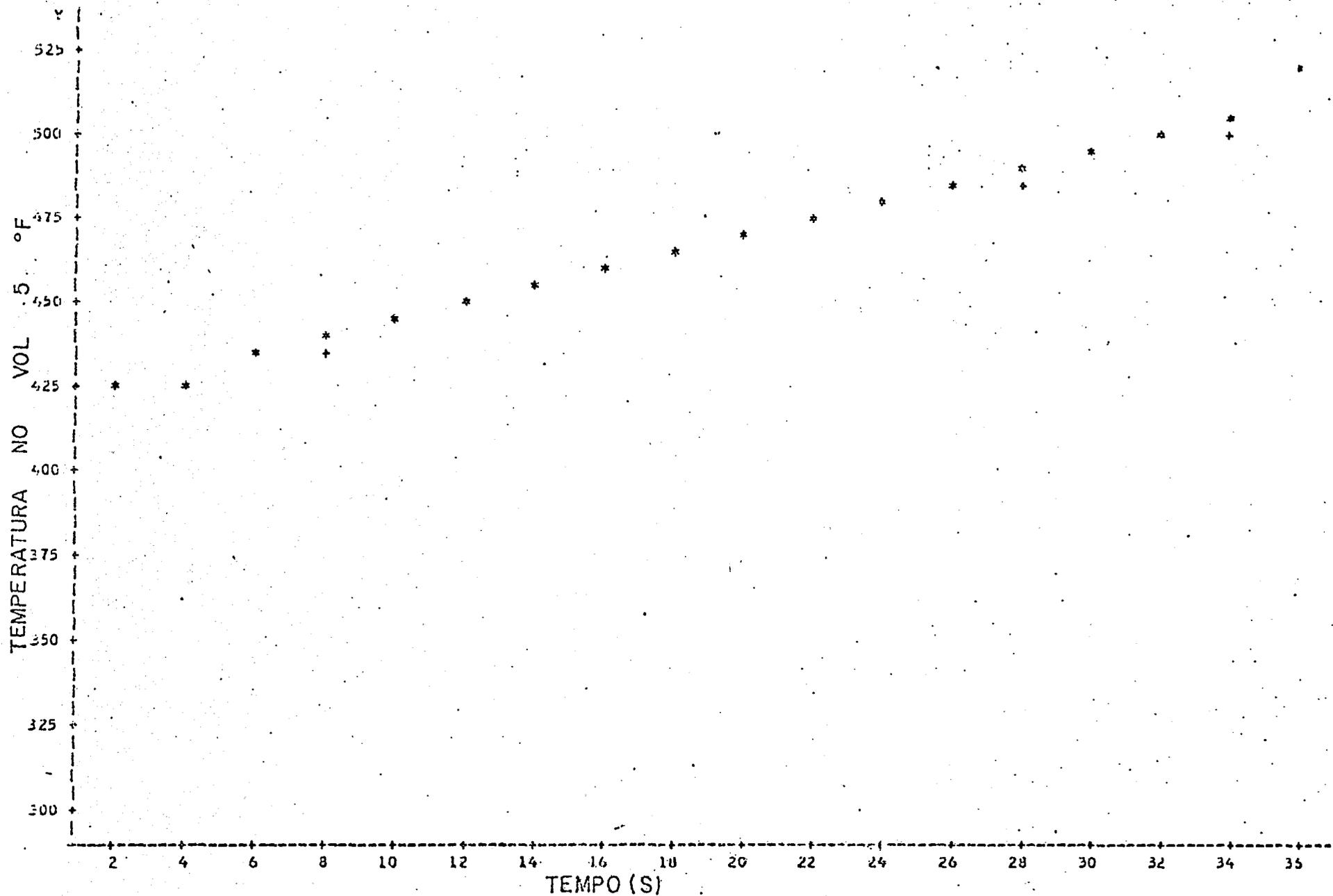


Figura 9 - Temperatura Média na Seção de Testes.

PLOT OF Y1\*X SYMBOL USED IS \* MOD3  
PLOT OF Y3\*X SYMBOL USED IS + MOD5

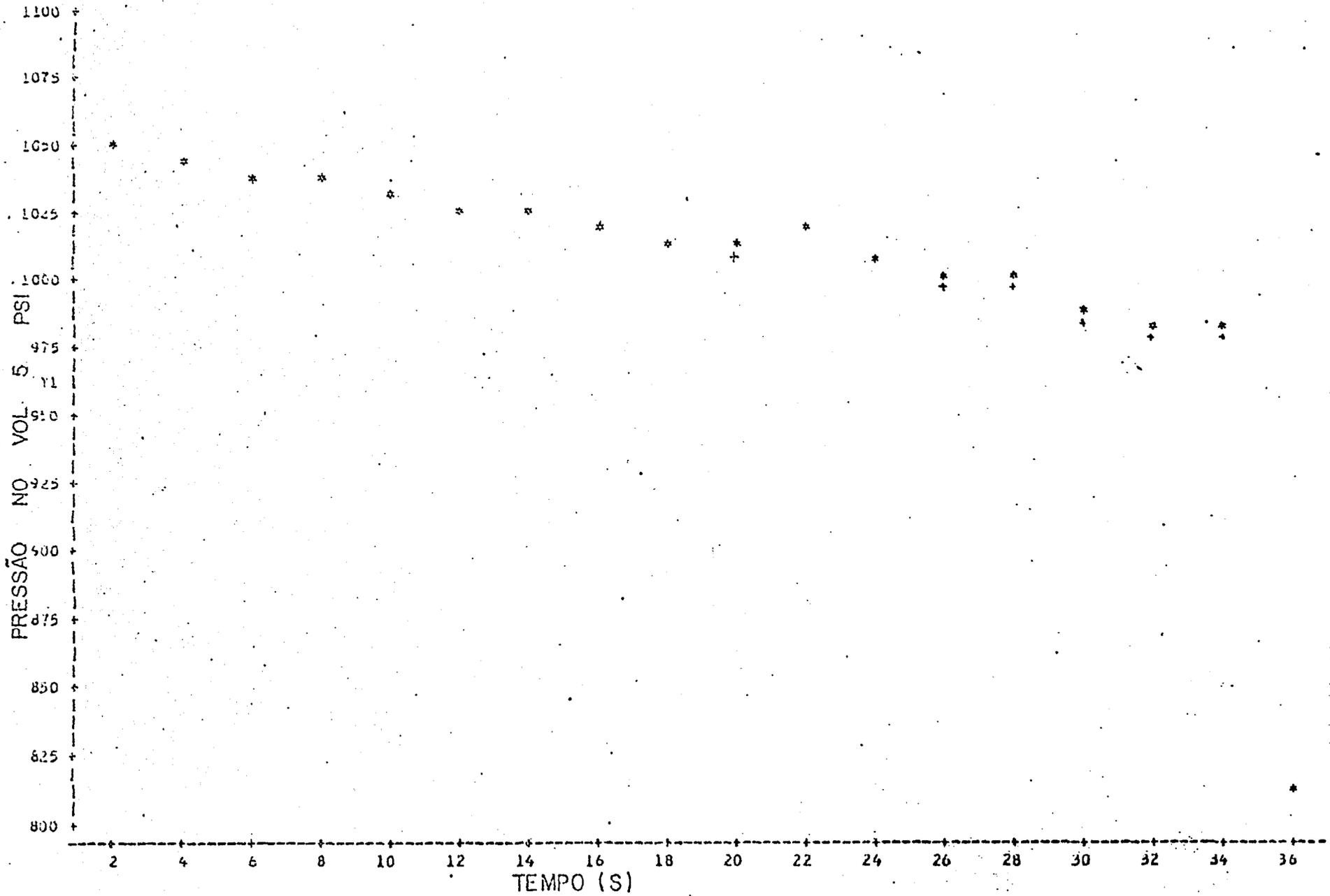


Figura 10 - Pressão Média na Seção de Testes.

A queda de pressão no volume 5 é acentuada, figura 10, ocorrendo também neste caso, uma mudança aos 36 segundos. Estas variações ocorridas aos 36 segundos se devem ao fato das placas de calor atingirem o valor de fluxo crítico.

## 7. Conclusões

Por meio dos resultados obtidos no item anterior, concluímos que:

- obtivemos um bom desempenho do Circuito Experimental de Água, através das simulações realizadas com o programa RELAP4 (versões MOD3 e MOD5); tanto no estado estacionário como no caso dos transientes analisados;
- o modelo usado para estas simulações, conseguiu traduzir os resultados desejados em pouco tempo de cpu e área de memória, otimizando assim, os custos de processamento;
- os acidentes simulados revelam que o Circuito Experimental de Água poderá suportar situações acidentais de operação desde que os sistemas de emergência entrem em ação, quando solicitados.
- no caso de um acidente tipo parada de bomba, os sistemas de emergência do Circuito Experimental de Água, deverão desligar a potência da barra aquecida dentro de 36 segundos.

Os acidentes simulados neste trabalho tem como ponto de partida o estado estacionário baseado em condições de projeto. O bom, seria partirmos de condições reais de funcionamento com a finalidade de obtermos resultados mais próximos da realidade.

Finalmente, por meio das comparações feitas, das versões MOD3 e MOD5 do código RELAP4, o que podemos dizer, baseados na teoria do programa, é que a versão MOD5 é a mais indicada por traduzir mais realisticamente as simulações feitas. Esta afirmativa poderá ser confirmada quando o Circuito Experimental de Água entrar em regime permanente de operação, e compararmos os resultados experimentais com os obtidos através do programa RELAP4.

## Agradecimentos

Ao Dr. Roberto Longo Freitas pelas discussões, sugestões e dedicação dispensada; e

Ao Dr. Artur José Gonçalves Faya pela oportunidade concedida para a participação no IV ENFIR, pela cooperação e amizade.

Referências Bibliográficas

1. BARNUND, D.J. & SOLBRIG, C.W. The RELAP4 computer code: part3. LOCA analysis results of a typical PWR plant. Nucl. Saf., 17(4): 422-36, 1976.
2. AEROJET NUCLEAR COMPANY. RELAP4/MOD5: a computer program for transient thermal-hidraulic analysis of nuclear reactors and selected systems. Idaho Falls, Idaho National Engineering Lab., 1976.
3. PROVING that emergency cooling works. Nucl. Eng. Int. 24 (280): 34-8, 1979.
4. EBESUI, A.M.; GOMES, A.V.; COSTA, G.J.S.; OTOMO, HARUYUKI; ALMEIDA, J.C.; BASSEL, W.S. Descrição do Circuito Experimental do IPEN, IPEN-CNEV/SP, 1981/1982.
5. FERNANDES FILHO, T.L. Análise de Eventuais Acidentes em Circuito Experimental de Água Utilizando o Código RELAP4. São Paulo, 1981. (Dissertação de Mestrado, IPEN, São Paulo).
6. GOODNIGHT, J.H. et al - SAS USER GUIDE. SAS Institute Inc. . Post office Box 10066. Raleigh, North Carolina 27605. 1979 Edition.