

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INIS-mf--6918

DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE
SIMULAÇÃO DE TRANSIENTES
TÉRMICOS NO CIRCULADOR DE ÁGUA DO
IPEN

Auro Correia Pontedeiro

Dissertação apresentada ao Instituto
de Pesquisas Energéticas e Nucleares
como parte dos requisitos para obten-
ção do grau de "Mestre — Área
Reatores Nucleares de Potência e
Tecnologia do Combustível Nuclear"

Orientador: Ahmet Aydin Konuk

SÃO PAULO
1980

A meus pais,

*Apparicio Correia Pontedeiro
e Maria de Lourdes Ramalho Pontedeiro*

A G R A D E C I M E N T O S

. Ao Dr. Ernani Augusto Lopes de Amorim, M.D. Superintendente do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, por tornar possível a realização deste trabalho.

. Ao Eng^o Pedro Bento de Camargo, Diretor Executivo do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, pelo apoio e estímulo recebidos.

. Ao Prof. Dr. Ahmet Aydin Konuk, Orientador deste trabalho, que propôs o tema e facultou os meios para sua realização acompanhando com sugestões, críticas e constantes incentivos.

. Ao Prof. Dr. José Antonio Diaz Dieguez, Gerente do Centro de Engenharia Nuclear, pela colaboração prestada.

. Aos Operadores e Analistas do Centro de Processamento de Dados, pela colaboração na execução dos programas.

. Ao Eng^o Metalúrgico, M.Sc., Ney Freitas de Quadros, pela ajuda prestada na execução dos gráficos, através do terminal de computador do Centro de Metalurgia Nuclear.

. Aos integrantes do Projeto do Circulador de Água, pelo apoio prestado durante a realização deste trabalho.

. Ao Eng^o Gil Martini Paula, pela execução dos Gráficos e Figuras apresentados.

. À Srta. Rita Lavinia Torriani, pelo excelente trabalho de datilografia.

. Aos colegas do Centro de Engenharia Nuclear, pelo apoio e constante interesse demonstrado.

. Ao amigo Henrique Martini Paula, pela colaboração, apoio e incentivo.

. Ao Prof. John Waldrep, pela revisão gramatical.

. À Betty, cujo apoio e estímulo contribuíram de forma decisiva para a realização deste trabalho.

R E S U M O

~~No presente trabalho~~ Desenvolve-se um modelo matemático para simulação de transientes térmicos no Circulador Experimental de Água (CEA) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, Brasil. O modelo é baseado nas equações de energia aplicadas a diversos componentes do CEA. Pela utilização do "System/360-Continuous Systems Modeling Program" CSMP da IBM, o sistema não linear de equações diferenciais de primeira ordem e equações algébricas não lineares obtido é resolvido. É feita uma otimização do tempo de utilização do computador e executada a simulação de uma operação típica do CEA. (autor)

MATHEMATICAL MODEL FOR SIMULATION OF THERMAL
TRANSIENTS IN THE WATER LOOP OF IPEN.

A B S T R A C T

~~This study develops~~ A mathematical model for simulation of thermal transients in the water loop at the Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, Brasil, ^{is developed} The model is based on energy equations applied to the components of the experimental water loop. The non-linear system of first order diferencial equations and of non-linear algebraic equations obtained through the utilization of the IBM "System/360 - Continuous System Modeling Program" (CSMP) is resolved. An optimization of the running time of the computer is made and a typical simulation of the water loop is executed.

ÍNDICE

	Pág.
INTRODUÇÃO	1
1. O CIRCULADOR EXPERIMENTAL DE ÁGUA DO IPEN	3
1.1. Operação PWR	3
1.2. Operação BWR	4
1.3. Os Equipamentos Modelados	4
1.3.1. Seção de Teste	4
1.3.2. Resfriador C-101	5
1.3.3. Resfriador C-102	6
1.3.4. Resfriador C-103	7
1.3.5. Bomba Principal P-101	8
1.3.6. Tubulações	12
2. O MODELO MATEMÁTICO	15
2.1. Transmissão de Calor por condução	15
2.1.1. Condução de calor em Estado Estacionário	15
2.1.2. Condução de Calor em Regime Transitório	16
2.2. Transmissão de Calor por Convecção	17
2.2.1. Coeficiente de Transmissão de Calor por Convecção Forçada	17
2.2.2. Coeficiente de Transmissão de Calor por Convecção Natural	19
2.3. Balanço de Energia	20
2.3.1. Balanço de Energia para a Seção de Teste	21
2.3.2. Balanço de Energia para a Bomba P-101	23
2.3.3. Balanço de Energia para as Tubulações	24
2.3.4. Balanço de Energia para o Resfriador C-101	24
2.3.5. Balanço de Energia para os Resfriadores C-102 e C-103	28
2.3.6. Balanço de Energia para os Nós "A", "B" e "C"	28

	Pág.
3. ESTUDO NUMÉRICO DO MODELO MATEMÁTICO	34
3.1. Passo de Integração Crítico	34
3.2. Simplificação do Modelo	37
3.3. Escolha de Método de Integração	38
4. ANÁLISE DE RESULTADOS	45
4.1. Comparação com Valores de Projeto	45
4.2. Simulação de uma Operação Típica do CEA	47
CONCLUSÕES	55
APÊNDICE I - CONTINUOUS SYSTEM MODELING PROGRAM - CSMP	56
APÊNDICE II - PROGRAMAÇÃO E LISTAGEM DO PROGRAMA	63
APÊNDICE III - GRÁFICOS E RESULTADOS	76
APÊNDICE IV - CORRELAÇÃO DE DONOHUE PARA COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	82
APÊNDICE V - DESENHOS DOS EQUIPAMENTOS DO CEA	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1.	9
FIGURA 1.2.	11
FIGURA 1.3.	12
FIGURA 2.1.	21
FIGURA 2.2.	25
FIGURA 3.1.	43
FIGURA 3.2.	44
FIGURA 4.1.	48
FIGURA 4.2.	49
FIGURA 4.3.	50
FIGURA 4.4.	51
FIGURA 4.5.	52
FIGURA 4.6.	53
FIGURA 4.7.	54
FIGURA III-1	78
FIGURA III-2	79
FIGURA III-3	80
FIGURA III-4	81
FIGURA V-1	89
FIGURA V-2	90
FIGURA V-3	91
FIGURA V-4	92
FIGURA V-5	93

INTRODUÇÃO

Diversos códigos digitais desenvolvidos para a simulação termo-hidráulica de reatores nucleares refrigerados à água leve, tais como o RELAP-4 (ref. 1) e FLASH-4 (ref. 13), podem ser adaptados para o cálculo de transientes térmicos em um circuito simulador de reatores nucleares, no que diz respeito a sua parte termo-hidráulica, como é o caso do Circulador Experimental de Água CEA, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). O CEA, que atualmente se encontra na fase de montagem, foi projetado para simular reatores a água leve dos tipos PWR (Pressurized Water Reactor) e BWR (Boiling Water Reactor).

Contudo, os códigos acima citados, apresentam os inconvenientes de exigirem grande capacidade de memória de computador e elevado tempo de processamento, além de não estarem disponíveis com facilidade. Essas desvantagens se traduzem por um alto custo de utilização desses códigos, mesmo para a solução de problemas relativamente simples. Assim sendo, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo matemático para a simulação de transientes térmicos no CEA quando este estiver operando de modo a simular reatores do tipo PWR (onde não é considerado escoamento em regime bifásico).

O Modelo Matemático consiste de balanços não estacionários de energia, aplicados aos diversos componentes do CEA. O sistema resultante de equações diferenciais e algébricas é então solucionado utilizando-se o CSMP (ref. 6), que é um programa para solução de sistemas de equações diferenciais ordinárias com valores iniciais e de equações algébricas.

O programa fornece a distribuição temporal de temperatura

raturas nos diversos pontos do CEA. Isto serve para prever valores dos parâmetros de operação (como vazão de água, por exemplo) a fim de que as temperaturas desejadas em pontos determinados ao longo do CEA sejam atingidas. Além disso, a previsão da duração de transientes térmicos de partida e de desligamento ajudará no planejamento das operações do circulador de água. Modificações eventuais no circulador poderão também ser estudadas por meio do modelo.

No Capítulo 1 descrever-se-á, em linhas gerais, o que é o CEA e seus equipamentos considerados no modelo. No Capítulo 2 tratar-se-á das leis fundamentais da transmissão de calor e suas aplicações nos balanços de energia. No Capítulo 3 realizar-se-á um estudo numérico do modelo visando a otimização do tempo de utilização de computador. No capítulo 4 apresentar-se-á os resultados obtidos pelo modelo na simulação de uma operação típica do CEA .

1. O CIRCULADOR EXPERIMENTAL DE ÁGUA DO IPEN

O Circulador Experimental de Água (CEA) do IPEN é um simulador do sistema termo-hidráulico de reatores nucleares refrigerados a água leve, tipos PWR (Pressurized Water Reactor) e BWR (Boiling Water Reactor), sendo que o calor, em vez de ser gerado por elementos combustíveis nucleares, é produzido por meio de resistências elétricas.

O CEA foi projetado tendo por objetivo possibilitar a avaliação de parâmetros termo-hidráulicos de reatores nucleares em regime de escoamentos monofásico e bifásico sob diversas geometrias, além de efetuar ensaios de equipamentos e de possibilitar treinamento de pessoal.

Os principais elementos constituintes do CEA são:

- Seção de Teste (Aquecedor)
- Bomba Principal
- Separador de Vapor
- Pressurizador
- Condensador Resfriador
- Resfriadores Complementares
- Desionizador
- Desaerador

1.1. Operação PWR

Para a operação PWR do CEA, (vide figura 1.1 , pg 9) a água de teste sai da Bomba Principal com a temperatura de 195°C e seu fluxo de massa é de 4,47kg/s. Desse fluxo de massa 3,00kg/s segue para a Seção de Teste, onde o líquido é aquecido até 285°C. Da Seção de Teste a água vai para o resfriador C-101, de onde sai

com a temperatura de 216°C ; a parte do fluxo de água que sai da bomba e não segue para a Seção de Teste ($1,47\text{kg/s}$) vai em direção ao resfriador C-102, que exerce a função de controlador da temperatura no circuito; assim, a água que deixa o resfriador C-102 sai à temperatura de 124°C . O resfriador C-103 recebe a água resfriada pelo resfriador C-102 e fornece água para tratamento no Desionizador a uma temperatura máxima de 50°C .

1.2. Operação BWR

Em operação para simulação de reatores tipo BWR, escoamento bifásico, a mistura sai da Seção de Teste com cerca de 10 a 35% de vapor, seguindo para o Separador de Vapor (vide figura 1.2). O vapor, uma vez separado, é então totalmente condensado no condensador C-101.

1.3. Os Equipamentos Modelados

O Modelo Matemático de simulação do CEA, aqui desenvolvido, busca representar transientes térmicos para operação PWR. Assim sendo, foram considerados na elaboração do modelo apenas os seguintes componentes do CEA:

- Seção de Teste S.T.
- Resfriador C-101
- Resfriador C-102
- Resfriador C-103
- Bomba Principal P-101

1.3.1. Seção de Teste - S.T.

A S.T. é constituída por um tubo vertical de tipo

inox 304, com 4" de diâmetro e 4m de comprimento, no interior do qual se encontram 9 barras aquecedoras em arranjo quadrangular 3x3 (vide figura 1, Apêndice V). Externamente, a S.T. é isolada termicamente por 2" de silicato de cálcio, sob a forma de meia cana cilíndrica. A tensão de alimentação das barras aquecedoras pode ser regulada de 20 a 70 V c.c, sob a potência máxima de 1300 kw.

1.3.2. Resfriador C-101

O resfriador C-101 é do tipo "Casco e Tubos em U" , com chicanas segmentadas.

A água de processo, circuito primário, circula pelo lado do casco enquanto que a água de resfriamento, circuito secundário, circula pelos tubos em U (vide figura 2, Apêndice V). As chicanas segmentadas do C-101 são verticais, com área livre de fluxo igual a 25% da área da seção transversal do casco.

Especificações:

- Área de Resfriamento:	4,4 m ²
- Capacidade de Resfriamento:	3,0kg/s
- Temperatura de entrada da água de processo:	285°C
- Pressão de entrada da água de processo:	69,5kgf/cm ²
- Temperatura de saída da água de processo:	216°C

- Pressão de saída da água de processo: 6,0 kgf/cm²
- Potência consumida: 1010 kw
- Diâmetro interno do casco: 2984 mm
- Espessura do casco: 12,7 mm
- Número de chicanas: 8
- Material do casco: aço inox 304

Tubos U (3"/4 BWG16)

- Diâmetro externo: 19 mm
- Espessura: 1,65 mm
- Arranjo Triangular: 15/16"
- Número de tubos em U: 25
- Comprimento reto útil: 1500 mm
- Material dos tubos em U: aço inox 304

1.3.3. Resfriador C-102

O resfriador C-102 é do tipo casco e tubos em U, com chicanas segmentadas. Neste resfriador, a água de processo circula no interior dos tubos em U, enquanto que a água de resfriamento circula pelo lado do casco (vide figura 3, Apêndice V).

No C-102, as chicanas segmentadas são horizontais, sendo que a área livre do fluxo corresponde a 25% da área da seção transversal do casco. O casco do C-102 não é dotado de isolamento térmico.

Especificações:

- Área de resfriamento: 2,2 m²
- Capacidade de resfriamento: 0,79 kg/s

- Temperatura de entrada da água de processo: 195°C
- Pressão de entrada da água de processo: 78kgf/cm²
- Temperatura de saída da água de processo: 124,5°C
- Pressão de saída da água de processo: 6kgf/cm²
- Potência consumida: 243 kw
- Diâmetro interno do casco: 202,7 mm
- Número de chicanas: 12
- Material do casco: aço carbono

Tubos "U" (3"/4 BWG16)

- Diâmetro externo: 19 mm
- Espessura: 1,65 mm
- Arranjo quadrangular: 1"
- Número de tubos em U: 10
- Comprimento reto útil: 1870 mm
- Material dos tubos em U: aço inox 304

1.3.4. Resfriador C-103

O resfriador C-103 é do tipo Tubo Duplo.

Pelo tubo interno circula a água de processo e pelo tubo externo, em contra-corrente, circula a água de resfriamento (Vi de figura 4, Apêndice V). O C-103 não possui isolamento térmico.

Especificações:

- Área de resfriamento: 4,67 m²
- Capacidade de Resfriamento: 0,15 kg/s
- Temperatura de entrada da água de processo: 124,5°C

- Temperatura de saída da água de processo: 50°C
- Potência consumida: 47 kw
- Tubo externo: 1 1/4" Sch 40-aço carbono
- Tubo interno: 34/" BWG16 - aço inox 304
- Quantidade de Módulos U: 7
- Arranjo: 1/3, contra-corrente

OBS.: O C-103 foi dimensionado para, em condições críticas transi-
tórias, ter uma capacidade de resfriamento de 0,20 kg/s, com
a água de processo entrando a 195°C e saindo a 50°C, dissipa-
ndo uma potência de até 124 kw.

1.3.5. Bomba Principal - P-101

A bomba principal do CEA é do tipo centrífuga hori-
zontal e selada (vide figura 5, Apêndice V).

Características

- Fluido de bombeamento: - água desmineralizada
- Densidade : - 0,885 g/cm³
- Fluxo de massa : - 20,86 kg/s
- Temperatura da água : - 195°C
- Pressão de entrada : - 71,7 kgf/cm²
- Pressão de saída : - 78,9 kgf/cm²
- Potência : - 85 kw
- Velocidade : - 3450 r.p.m.
- Altura manométrica : - 85 m.l.c.
- Torque : - 44,3 Nxm
- Material : - aço inox e aço carbono

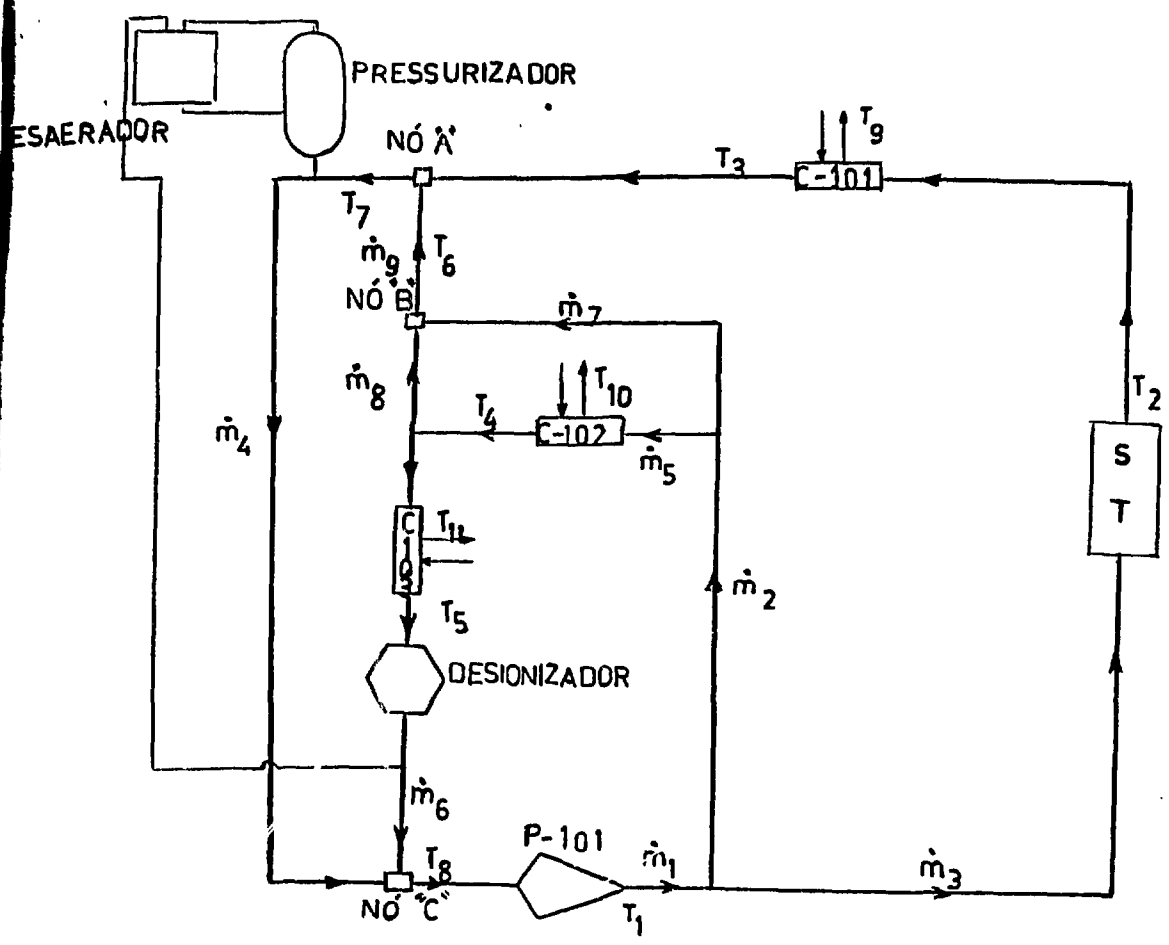


FIGURA 1.1 - Esquema do CEA para operação PWR.

- T₁ - temperatura da água de processo ao sair da bomba P-101
- T₂ - temperatura da água de processo ao sair da Seção de Teste
- T₃ - temperatura da água de processo ao sair do resfriador C-101
- T₄ - temperatura da água de processo ao sair do resfriador C-102
- T₅ - temperatura da água de processo ao sair do resfriador C-103
- T₆ - temperatura da água de processo ao sair do NÓ B
- T₇ - temperatura da água de processo ao sair do NÓ A
- T₈ - temperatura da água de processo ao sair do NÓ C
- T₉ - temperatura da água de arrefecimento ao sair do resfriador C-101
- T₁₀ - temperatura da água de arrefecimento ao sair do resfriador C-102
- T₁₁ - temperatura da água de arrefecimento ao sair do resfriador C-103

... a nomenclatura será usada no restante deste capítulo

DADOS DE PROJETO PARA OPERAÇÃO PWR

- Pressão: $70 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$
- Potência do aquecedor da Seção de Teste: 1300 kw
- Fluxo de massa ao longo do CEA:

$\dot{m}_1 = 4,47 \text{ kg/s}$	$\dot{m}_7 = 0,64 \text{ kg/s}$
$\dot{m}_2 = 1,47 \text{ kg/s}$	$\dot{m}_8 = 0,68 \text{ kg/s}$
$\dot{m}_3 = 3,00 \text{ kg/s}$	$\dot{m}_9 = 1,32 \text{ kg/s}$
$\dot{m}_4 = 4,32 \text{ kg/s}$	$\dot{m}_{R1} = 10,83 \text{ kg/s}$
$\dot{m}_5 = 0,79 \text{ kg/s}$	$\dot{m}_{R2} = 5,00 \text{ kg/s}$
$\dot{m}_6 = 0,15 \text{ kg/s}$	$\dot{m}_{R3} = 1,39 \text{ kg/s}$

- Temperaturas:

$T_1 = 195 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_7 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_2 = 285 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_8 = 195 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_3 = 216 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_9 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_4 = 124 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{10} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_5 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{11} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_6 = 161 \text{ }^\circ\text{C}$	

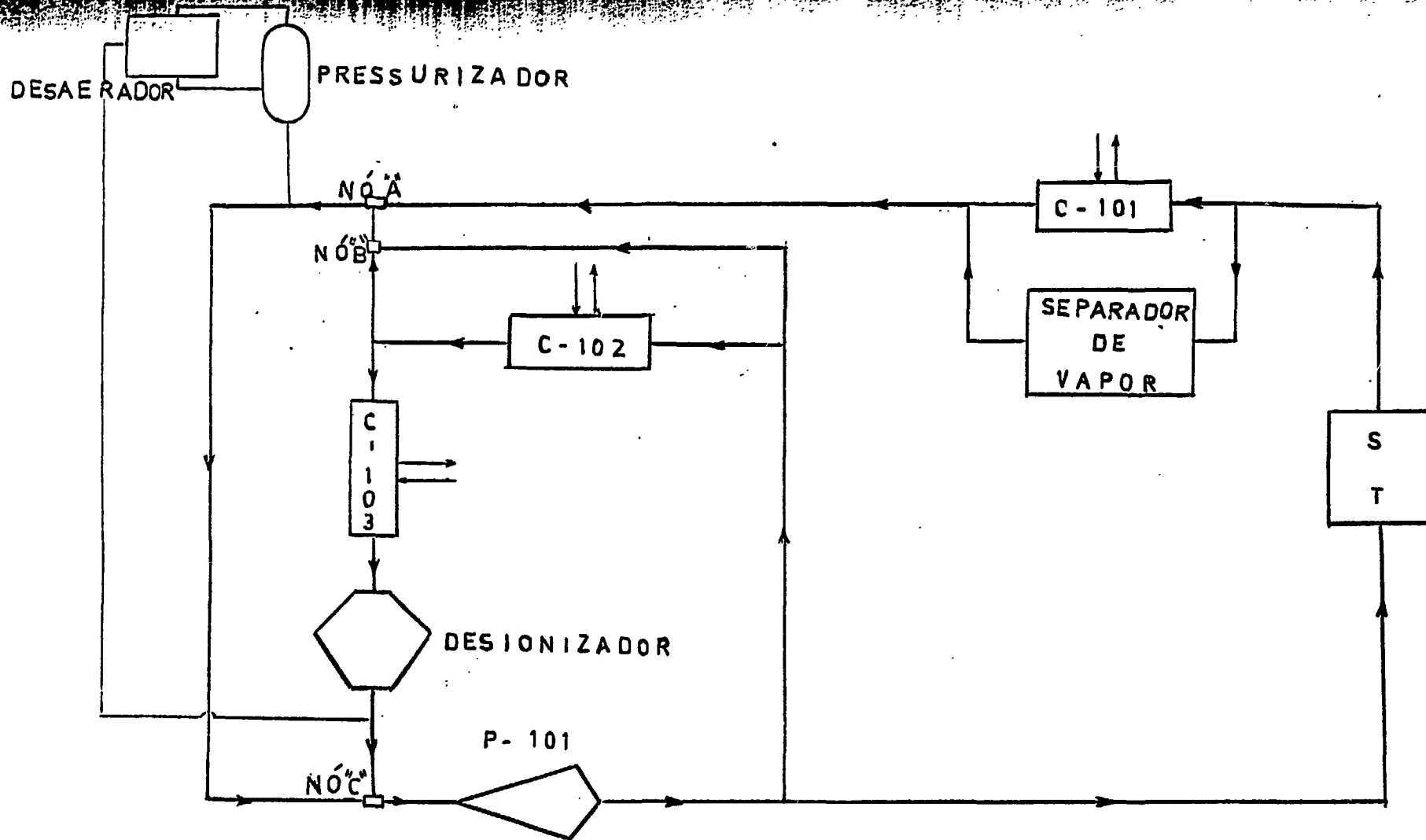


FIGURA 1.2 - Esquema do CEA para Operação BWR

1.3.6. Tubulações

Na concepção do modelo, foram consideradas 11 tubulações que interconectam os diversos equipamentos do CEA, como apresentado na tabela 1.1 e na figura 1.3.

Todas as tubulações são de aço inox 304 e termicamente isoladas por calhas de silicato de cálcio de espessura variável de acordo com o nível de temperatura, no qual a tubulação trabalha (vide tabela 1.2).

FIGURA 1.3 - Esquema das tubulações e Equipamento do CEA considerados no modelo.

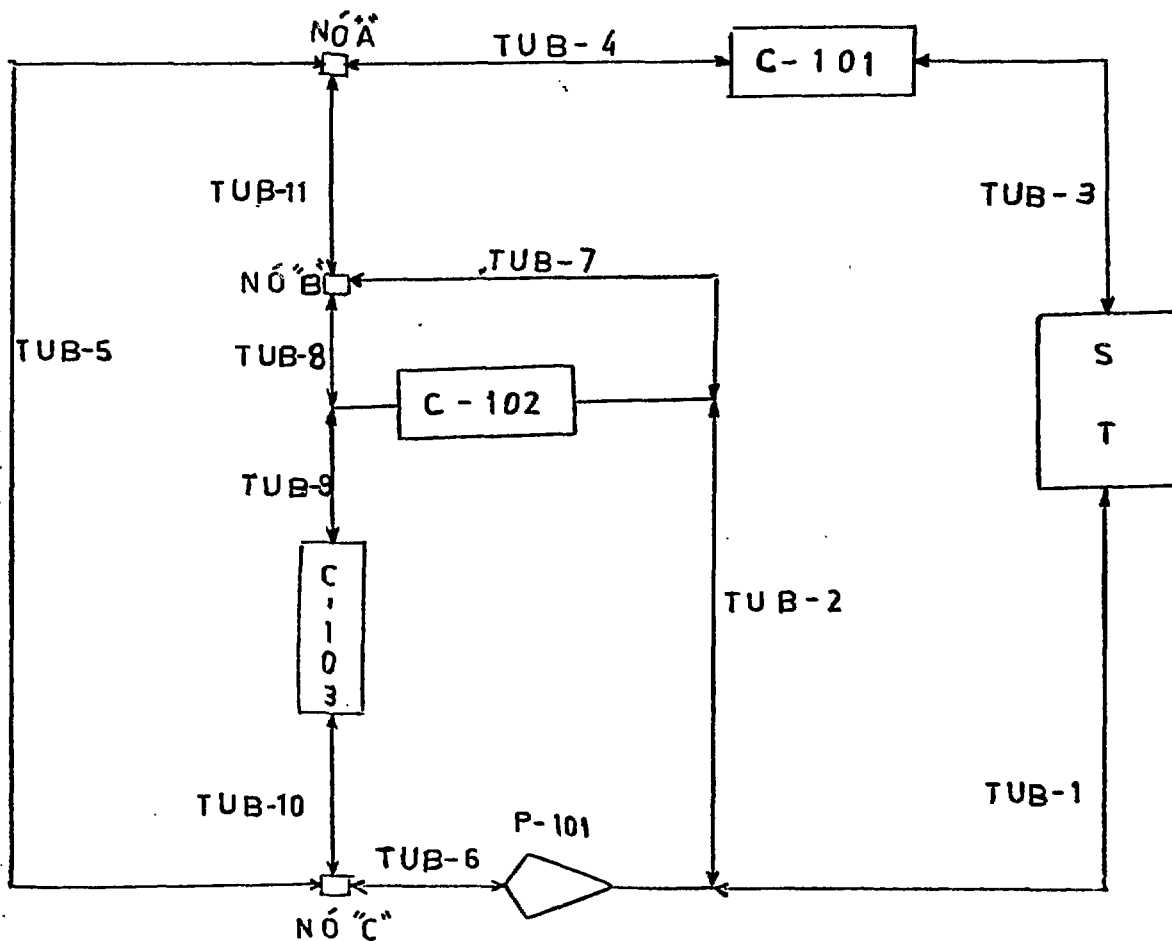


TABELA 1.1

Tubulação	Conexão	Diâmetro	Comprimento(m)
TUB-1	da saída da bomba P-101 até entrada da Seção Teste	3"	11,140
TUB-2	da saída da bomba P-101 até entrada do Resfriador C-102	2"	6,305
TUB-3	da saída da Seção de Teste até entrada do Resfriador C-101	2"	9,142
TUB-4	da saída do resfriador C-101 até entrada do NÓ "A"	2"	9,186
TUB-5	da saída do NÓ "A" até entrada do NÓ "C"	3"	2,015
TUB-6	da saída do NÓ "C" até entrada da bomba P-101	4"	3,150
TUB-7	da entrada do resfriador C-102 até entrada do NÓ "B"	2"	3,861
TUB-8	da saída do resfriador C-102 até entrada do NÓ "B"	1 1/2"	2,951
TUB-9	da saída do resfriador C-102 até entrada do resfriador C-103	3/4"	5,876
TUB-10	da saída do resfriador C-103 até entrada do NÓ "C"	3/4"	7,590
TUB-11	da saída do NÓ "B" até entrada do NÓ "A"	2"	0,391

TABELA 1.2

Diâmetro do tubo	Temperatura Máxima de Operação			
	50°C	230°C	260°C	290°C
até 1 1/2"	-	1 1/2"	2"	2"
2"	-	1 1/2"	2"	2"
3"	-	1 1/2"	2"	2"
4"	-	1 1/2"	2"	2"

2. O MODELO MATEMÁTICO

Transientes térmicos ocorrem no CEA, em condições normais de operação, seja pela variação das vazões da água de processo ou arrefecimento, ou então pela variação da potência da Seção de Teste. Esses desequilíbrios térmicos se fazem presentes, até que novo estado estacionário seja alcançado.

O modelo matemático desenvolvido neste trabalho busca simular os transientes térmicos acima referidos, através de equações de balanço macroscópico unidimensional de energia, aplicadas a volumes de controle ou à superfície de separação entre dois meios.

Nas equações de balanço energético, para a água, são representadas apenas variações de energia interna, sendo consideradas desprezíveis as variações de energia cinética e potencial.

Os balanços de energia são baseados nas leis de Fourier e de Newton, para transmissão de calor por condução e por convecção, respectivamente.

2.1. Transmissão de Calor por Condução

2.1.1. Condução de Calor em Estado Estacionário

A lei de Fourier para condução de calor em estado estacionário, $q = -k \nabla T$ (21), estabelece que o vetor densidade de fluxo de calor "q" é proporcional ao gradiente da temperatura " ∇T " e de sentido contrário.

Para uma dimensão, tem-se que:

$$q = k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.2)$$

2.1.2. Condução de Calor em Regime Transitório

Na solução da equação : $\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T$, (2.3), de condução de calor em regime transitório, utilizada para o cálculo de temperaturas nas paredes de tubos, foi adotada a solução para o estado permanente : $\nabla^2 T = 0$, (2.4), devido à complexidade apresentada na resolução da equação diferencial parcial 2.3. Tal aproximação é bastante aceitável em meios de condutividade térmica alta, onde pode-se supor que a distribuição de temperatura, em qualquer instante, seja uniforme. Assim sendo, para a condução radial em tubos, tem-se que :

$$T = T_1 - \frac{Q}{2\pi L k} \ln \left(\frac{r}{r_1} \right) \quad (2.5)$$

Para $r = r_2$, $T = T_2$, a equação (2.5) pode ser escrita, para o cálculo do fluxo de calor na superfície externa do tubo, como sendo:

$$Q = \frac{2\pi L k}{\ln(r_2/r_1)} (T_1 - T_2) \quad (2.6)$$

ou ainda

$$Q = C_c (T_1 - T_2) \quad (2.7)$$

onde

$$C_c = \frac{2\pi L k}{\ln(r_2/r_1)} \quad (2.8)$$

2.2. Transmissão de Calor por Convecção

Na lei de Newton, para transmissão de calor por convecção,

$$Q = h A \Delta T \quad (2.9)$$

o coeficiente de transmissão de calor por convecção, "h", para um dado sistema, depende da geometria da superfície, da velocidade e das propriedades físicas do fluido, bem como da diferença de temperatura entre o fluido e a superfície de escoamento, " ΔT ".

No presente trabalho, os coeficientes médios de transmissão de calor por convecção são avaliados através de correlações obtidas a partir do método da análise dimensional combinado com experiências.

2.2 1. Coefficientes de Transmissão de Calor por Convecção Forçada

Os coeficientes de transmissão de calor por convecção forçada entre a água de processo e as paredes internas das tubulações, da bomba P-101 e da Seção de Teste foram correlacionadas pela equação de Dittus-Boelter:

$$\frac{h_i D}{k_f} = 0,023 \left(\frac{DG}{\mu_f} \right)^{0,8} \left(\frac{Cp_f \mu_f}{k_f} \right)^{0,33} \quad (2.10)$$

onde as propriedades do fluido são funções da temperatura do filme,

$$T_f = 0,5 (T_w + T_B) \quad (2-11)$$

sendo T_w a temperatura da superfície de transmissão de calor e T_B a temperatura do fluido.

Para os resfriadores C-101 e C-102, que são do tipo "casco e tubos em U", os coeficientes de transmissão de calor por convecção na superfície externa dos tubos (lado do casco) foram calculados pela correlação de Donohue (vide Apêndice IV e referência 3).

$$\frac{h_o D}{k_f} = C \left(\frac{DG_o}{\mu_f} \right)^{0,6} \left(\frac{Cp_f \mu_f}{k_f} \right)^{0,33} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (2.12)$$

Na avaliação dos coeficientes de transmissão de calor por convecção na superfície interna dos tubos dos resfriadores C-101 e C-102, foi utilizada a correlação de Sieder-Tate,

$$\frac{h_i D}{k_f} = 0,023 \left(\frac{DG}{\mu_f} \right)^{0,8} \left(\frac{Cp \mu}{k} \right)_f^{0,33} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (2.13)$$

Nas equações 2.12 e 2.13, μ_f , Cp_f e k_f são funções da temperatura do filme (equação 2.11) e da pressão (1 atm para a água de resfriamento e 70 atm para a água de processo).

Para o resfriador C-103, tipo tubo duplo, tanto h_o como h_i foram calculados pela equação 2.12.

A partir dos coeficientes médios de transmissão de calor, dados pelas correlações já referidas, foram calculados os coeficientes globais de transmissão de calor, para os resfriadores C-101, C-102 e C-103, através da fórmula:

$$U_o = \frac{l}{\frac{1}{h_o} + \frac{D_e \ln(D_e/D_i)}{2.k} + \frac{D_e}{D_i} \frac{1}{h_i} + r_d} \quad (2.14)$$

Os coeficientes de transmissão de calor por convecção forçada na superfície interna dos cascos dos resfriadores foram tomados como sendo iguais aos respectivos coeficientes de transmissão de calor por convecção na superfície externa dos tubos.

Para os cálculos do calor transmitido ao fluido por convecção forçada na direção axial, utilizou-se a equação:

$$A = \dot{m} C_p \Delta T_b \quad (2.15)$$

2.2.2. Coefficiente de Transmissão de Calor por Convecção Natural

As correlações utilizadas no cálculo dos coeficientes de transmissão de calor por convecção natural são as recomendadas por Mc Adams (ref. nº 11, pags. 180 a 187).

Assim sendo, para cilindros verticais,

$$Nu_v = \frac{h_v L}{k} = 0,59 (Gr_v Pr)^{0,25} \quad (2.16)$$

e para cilindros horizontais:

$$Nu_H = \frac{h_H D}{k} = 0,53 (Gr_H Pr)^{0,25} \quad (2.17)$$

onde: $Pr = \frac{C_p \mu}{K} \quad (2.18)$

$$Gr_V = L^3 \frac{\rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (2.19)$$

$$Gr_H = D^3 \frac{\rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (2.20)$$

e todas as propriedades do fluido são calculadas na temperatura do filme.

Em tubulações cujo comprimento (L) é parte vertical (L_V) e parte horizontal (L_H), foi definido um coeficiente de transmissão de calor por convecção natural (h_{ar}), ponderado em relação ao comprimento vertical e horizontal, de forma que:

$$h_{ar} = \frac{L_V h_V + L_H h_H}{L} \quad (2.21)$$

2.3. Balço de Energia

Em cada componente do CEA, o balanço de energia é feito para a massa de água contida em seu interior, para a massa de aço de que o componente é constituído, para a massa de seu isolamento térmico, e ainda em sua superfície externa em contato com o ar.

2.3.1. Balço de Energia para a Seção de Teste

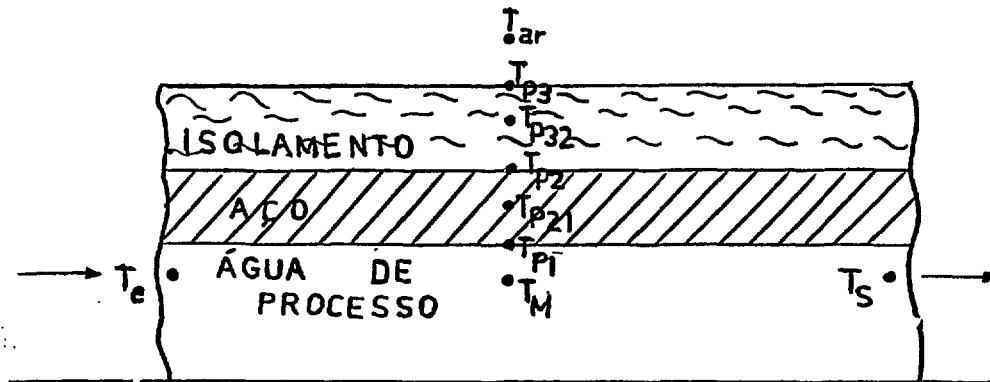


FIGURA 2.1 - Esquema de um corte longitudinal da Seção de Teste

T_e = temperatura de entrada da água

T_s = temperatura de saída da água

T_M = temperatura média da água, onde: $T_M = (T_e + T_s) / 2$

T_{P1} = temperatura na superfície interna do tubo de aço

T_{P2} = temperatura na superfície externa do tubo de aço

T_{P21} = temperatura média do tubo de aço, onde: $T_{P21} = (T_{P1} + T_{P2}) / 2$

T_{P3} = temperatura na superfície externa do isolamento térmico

T_{P32} = temperatura média do isolamento térmico, onde:

$$T_{P32} = (T_{P2} + T_{P3}) / 2$$

T_{ar} = temperatura do ar atmosférico.

A Seção de Teste é modelada como sendo um tubo de aço, com água em seu interior e recoberto por um tubo concêntrico de silicato de cálcio. A potência das resistências elétricas de aquecimento da Seção de Teste é aplicada diretamente à massa de água contida na mesma. As diversas temperaturas no interior da

S.T. são representadas na Figura 2.1.

2.3.1.1. Balanço de Energia para a água da Seção de Teste

$$\underbrace{MC_p \frac{dT_M}{dt}}_{(i)} = \underbrace{\dot{m} C_p (T_e - T_s)}_{(ii)} - \underbrace{hA (T_M - T_{P1})}_{(iii)} + \underbrace{\dot{P}}_{(iv)} \quad (2.22)$$

- (i) - Velocidade de acumulação de energia interna na massa de água
- (ii) - Fluxo de calor por convecção axial na água
- (iii) - Fluxo de calor por convecção radial na água
- (iv) - Potência fornecida à água pelas resistências elétricas

2.3.1.2. Balanço de Energia para o aço da Seção de Teste

$$\underbrace{MC_w \frac{dT_{P21}}{dt}}_{(i)} = \underbrace{hA (T_M - T_{P1})}_{(ii)} - \underbrace{C_{cA} (T_{P1} - T_{P2})}_{(iii)} \quad (2.23)$$

- (i) - Velocidade de acumulação de energia interna na massa de aço.
- (ii) - Fluxo de calor por convecção radial na água
- (iii) - Fluxo de calor por condução radial no aço.

2.3.1.3. Balço de Energia para o Isolamento Térmico (Silicato de Cálcio) da Seção de Teste

$$\underbrace{MC_i \frac{dT_{P32}}{dt}}_{(i)} = \underbrace{Cc_A (T_{P1} - T_{P2})}_{(ii)} - \underbrace{Cc_I (T_{P2} - T_{P3})}_{(iii)} \quad (2.24)$$

- (i) - Velocidade de acumulação de energia interna na massa de silicato de cálcio do isolamento térmico da S.T.
- (ii) - Fluxo de calor por condução radial no aço
- (iii) - Fluxo de calor por condução radial no silicato de cálcio

2.3.1.4. Balço de Energia para a Superfície Externa da Seção de Teste

$$\underbrace{Cc_I (T_{P2} - T_{P3})}_{(i)} = \underbrace{h_{ar} A (T_{P3} - T_{ar})}_{(ii)} \quad (2.25)$$

- (i) - Fluxo de calor por condução radial no silicato de cálcio.
- (ii) - Fluxo de calor por convecção natural no ar

2.3.2. Balço de Energia para a Bomba P-101

Para efeito de modelagem a bomba P-101 foi considerada como se fosse um tubo de aço inox de 1,00m de comprimento, com 7,98 cm de diâmetro interno e 1,00 cm de espessura, sem isolamento térmico em seu exterior.

O balanço de energia para a Bomba P-101 foi feito

de maneira análoga ao balanço para Seção de Teste (equações: 2.22 a 2.25), tendo por diferenças apenas:

- na equação 2.22, "P" passa a ser a potência que a bomba transmite para a água;

- a equação 2.24 não é aplicada, já que a bomba não possui isolamento térmico.

- na equação 2.25 o fluxo de calor por convecção natural no ar fica sendo igual ao fluxo de calor radial no aço.

2.3.3. Balanço de Energia para as Tubulações

Das 11 tubulações especificadas na tabela 1.1 do capítulo 1, foram aplicados balanços de energia apenas às 7 primeiras (TUB-1 a TUB-7), não sendo considerados nem as tubulações com diâmetro menor que 2", (TUB-8, TUB-9 e TUB-10), nem as tubulações de comprimento inferior a 1 m (TUB-11).

Ao desconsiderar-se, para efeito de balanço energético, uma certa tubulação, esta -se supondo no modelo que a temperatura com que a água entra nessa tubulação é igual à temperatura com que a água sai dessa tubulação.

O balanço de energia para as tubulações também segue o mesmo procedimento utilizado nas equações de números 2.22 a 2.25, sendo que a única exceção diz respeito ao valor de P na equação 2.23, que nesse caso vale zero.

2.3.4. Balanço de Energia para o Resfriador C-101

Nos resfriadores, o balanço de energia é feito para a água de processo, água de resfriamento, aço, isolamento térmico e superfície externa em contato com o ar.

No C-101, a água de processo circula pelo casco (circuito primário) e a água de resfriamento pelo interior dos tubos (circuito secundário). O seu casco é de aço inox e seu isolamento térmico de silicato de cálcio.

O esquema dos diversos níveis de temperatura no interior do C-101, e que são considerados pelo modelo, é representado na figura 2.2.

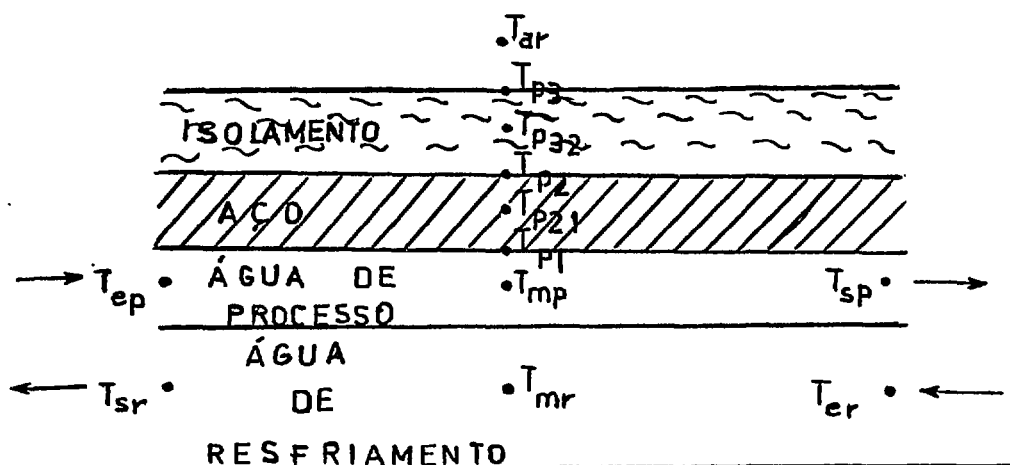


FIGURA 2.2 - Esquema de um Corte Longitudinal dos diversos níveis de temperatura no interior do C-101, considerados no modelo.

- T_{ep} - temperatura de entrada da água de processo
- T_{sp} - temperatura de saída da água de processo
- T_{MP} - temperatura média da água de processo onde: $T_{MP} = (T_{ep} + T_{sp}) / 2$
- T_{P1} - temperatura na superfície interna do casco
- T_{P2} - temperatura na superfície externa do casco
- T_{P21} - temperatura média da parede de aço do casco, onde: $T_{P21} = (T_{P2} + T_{P1}) / 2$
- T_{P3} - temperatura na superfície externa de isolamento térmico
- T_{P32} - temperatura média do isolamento térmico, onde $T_{P32} = (T_{P2} + T_{P3}) / 2$

T_{ar} - temperatura do ar

T_{e_r} - temperatura de entrada da água de resfriamento

T_{s_r} - temperatura de saída da água de resfriamento

T_{Mr} - temperatura média da água de resfriamento, onde:

$$T_{Mr} = (T_{e_r} + T_{s_r}) / 2$$

2.3.4.1. Balanço de Energia para a água de processo do Resfriador C-101

$$\underbrace{MCp \frac{d T_{MP}}{dt}}_{(i)} = \underbrace{\dot{m} Cp (T_{e_p} - T_{s_p})}_{(ii)} - \underbrace{hA(T_{MP} - T_{Pl})}_{(iii)} - \underbrace{A_o U_o (T_{MP} - T_{Mr})}_{(iv)} \quad (2.26)$$

- (i) - Velocidade de acumulação de energia interna na massa de água de processo contida no casco do C-101
- (ii) - Fluxo de calor por convecção axial na água de processo
- (iii) - Fluxo de calor por convecção radial na água de processo
- (iv) - Fluxo de calor entre os circuitos primários e secundários

2.3.4.2. Balanço de Energia para o aço do C-101

$$\underbrace{MC_w \frac{d T_{P21}}{dt}}_{(i)} = \underbrace{h A (T_{MP} - T_{Pl})}_{(ii)} - \underbrace{C_{cA} (T_{Pl} - T_{P2})}_{(iii)} \quad (2.29)$$

- (i) - Velocidade de acumulação de energia interna na massa de processo
- (ii) - Fluxo de calor por convecção radial na água de processo
- (iii) - Fluxo de calor por condução radial no aço

2.3.4.3. Balanço de Energia para o Isolamento Térmico (Silicato de Cálcio) do C-101

$$\underbrace{MC_i \frac{d T_{P32}}{dt}}_{(i)} = \underbrace{Cc_A (T_{P1} - T_{P2})}_{(ii)} - \underbrace{Cc_I (T_{P2} - T_{P3})}_{(iii)} \quad (2.28)$$

- (i) - Velocidade de acumulação de energia interna na massa de silicato de cálcio do isolamento térmico do C-101
- (ii) - Fluxo de calor por condução radial no aço
- (iii) - Fluxo de calor por condução radial no silicato de cálcio

2.3.4.4. Balanço de Energia para a Superfície Externa do C-101

$$\underbrace{Cc_I (T_{P2} - T_{P3})}_{(i)} = \underbrace{h_{ar} A (T_{P3} - T_{ar})}_{(ii)} \quad (2.29)$$

- (i) - Fluxo de calor por condução radial no silicato de cálcio
- (ii) - Fluxo de calor por convecção natural no ar

2.3.4.5. Balanço de Energia para a água de Resfriamento

$$\underbrace{mCp \frac{d T_{Mr}}{dt}}_{(i)} = \underbrace{\dot{m}Cp (T_{e_r} - T_{s_r})}_{(ii)} + \underbrace{A_o U_o (T_{Mp} - T_{Mr})}_{(iii)} \quad (2.30)$$

- (i) - Velocidade de acumulação de energia na massa de água de resfriamento contida nos tubos do C-101
- (ii) - Fluxo de calor por convecção axial na água de resfriamento
- (iii) - Fluxo de calor entre os circuitos primários e secundário

2.3.5. Balanço de Energia para os Resfriadores C-102 e C-103

O balanço de energia nos resfriadores C-102 e C-103 foi feito de maneira análoga ao realizado para o resfriador C-101 e dado pelas equações de números 2.26 a 2.30.

Como nos resfriadores C-103 e C-102, ao contrário do que ocorre no C-101, a água de resfriamento circula pelo lado do casco e a água de processo no interior dos tubos, a equação 2.26 passa a ser aplicada para a água de resfriamento e a 2.30 para a água de processo; e ainda como o C-102 e o C-103 não são isolados termicamente, a equação 2.28 não é aplicada, e na equação 2.29, o fluxo de calor por convecção natural no ar fica sendo igual ao fluxo de calor por condução radial no aço.

2.3.6. Balanço de Energia para os nós "A", "B" e "C"

Os nós "A", "B" e "C" são definidos no modelo como sendo pontos de interligação de tubulações, onde duas vazões de água de processo sob duas temperaturas diferentes, se unem resultando em novo valor para a temperatura da água. A localização dos nós "A", "B" e "C" no CEA pode ser visualizada na figura 1.1 do capítulo 1. Assim, para um nó genérico em que estejam chegando as vazões em massa, \dot{m}_1 e \dot{m}_2 , com temperaturas da água iguais a T_{e1} e T_{e2} , respectivamente, e com a água saindo do nó com temperatura T_s e vazão em massa \dot{m}_s (onde $\dot{m}_s = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$), pode-se escrever a equação de balanço energético como sendo:

$$\dot{m}_s C_{p_s} T_s = \dot{m}_1 C_{p_{e1}} T_{e1} + \dot{m}_2 C_{p_{e2}} T_{e2} \quad (2.31)$$

onde:

$C_{p_{e1}}$ - calor específico a pressão constante, para a água na temperatura T_{e1}

$C_{p_{e2}}$ - calor específico a pressão constante, para a água
na temperatura T_{e2}

C_{p_s} - calor específico a pressão constante para a água
na temperatura T_s

NOMENCLATURA DO CAPÍTULO 2

- A - área de troca de calor, (m²)
- C - constante numérica
- Cc - $Cc = \frac{2 \pi L k}{\ln(r_2/r_1)}$ (W/°C)
- Cc = Cc_A, para aço inox;
- Cc = Cc_{Ac}, para aço carbono
- Cc = Cc_I, para silicato de cálcio
- Cpe₁ - calor específico a pressão constante, para água na temperatura Te₁ (J/kg°C)
- Cp_f - calor específico a pressão constante, calculado na temperatura do filme (J/kg°C)
- Cpe₂ - calor específico a pressão constante, para a água na temperatura Te₂ (J/kg°C)
- Cp - calor específico (J/kg°C)
- Cp_s - calor específico a pressão constante para a água na temperatura Ts (J/kg°C)
- C_w - calor específico do aço (J/kg°C)
- C_i - calor específico do isolamento (J/kg°C)
- D - diâmetro (m)
- De - diâmetro externo de um tubo (m)
- Di - diâmetro interno de um tubo (m)
- G - velocidade de massa (kg/sm²)
- G_o - velocidade de massa ponderada (kg/sm²)
- Gr - número de Grashof
- Gr_v - número de Grashof para tubos verticais
- Gr_H - número de Grashof para tubos horizontais

- g - aceleração da gravidade (m/s^2)
 h - coeficiente de transmissão de calor por convecção ($w/m^2 \text{ } ^\circ C$)
 h_o - coeficiente de transmissão de calor por convecção forçada na parede externa de um tubo ($w/m^2 \text{ } ^\circ C$)
 h_i - coeficiente de transmissão de calor por convecção na parede interna de um tubo ($w/m^2 \text{ } ^\circ C$)
 h_v - coeficiente de transmissão de calor por convecção natural em tubos verticais ($w/m^2 \text{ } ^\circ C$)
 h_H - coeficiente de transmissão de calor por convecção natural em tubos horizontais ($w/m^2 \text{ } ^\circ C$)
 h_{ar} - coeficiente de transmissão de calor por convecção natural em tubos ($w/m^2 \text{ } ^\circ C$)
 k - condutividade térmica ($w/m \text{ } ^\circ C$)
 k_f - condutividade térmica do fluido, na temperatura do filme ($w/m \text{ } ^\circ C$)
 L - comprimento (m)
 L_v - comprimento vertical (m)
 L_H - comprimento horizontal (m)
 M - massa (kg)
 \dot{m} - fluxo de massa do fluido (kg/s)
 \dot{m}_s - vazão em massa (kg/s)
 Nu - número de Nusselt
 Nu_v - número de Nusselt para convecção natural em tubos verticais
 Nu_H - número de Nusselt para convecção natural em tubos horizontais
 P - potência (w)
 Pr - número de Prandtl
 Q - fluxo de calor (W)

- q - fluxo de calor por unidade de área (w/m^2)
 r - raio (m)
 r_1 - raio interno de um tubo (m)
 r_2 - raio externo de um tubo (m)
 r_d - coeficiente de depósito ($m^2 \text{ } ^\circ C/w$)
 T - temperatura ($^\circ C$)
 T_1 - temperatura na parede interna de um tubo ($^\circ C$)
 T_2 - temperatura na parede externa de um tubo ($^\circ C$)
 T_f - temperatura do filme ($^\circ C$)
 T_w - temperatura da superfície de transmissão de calor ($^\circ C$)
 T_B - temperatura do fluido ($^\circ C$)
 T_e - temperatura de entrada da água ($^\circ C$)
 T_s - temperatura de saída da água ($^\circ C$)
 T_M - temperatura média da água ($^\circ C$)
 T_{p1} - temperatura na superfície interna do tubo de aço ($^\circ C$)
 T_{p2} - temperatura na superfície externa do tubo de aço ($^\circ C$)
 T_{p21} - temperatura média do tubo de aço ($^\circ C$)
 T_{p3} - temperatura na superfície externa do isolamento térmico ($^\circ C$)
 T_{p32} - temperatura média do isolamento térmico ($^\circ C$)
 T_{ar} - temperatura do ar atmosférico ($^\circ C$)
 T_{Mp} - temperatura média da água de processo ($^\circ C$)
 T_{ep} - temperatura de entrada da água de processo ($^\circ C$)
 T_{sp} - temperatura de saída da água de processo ($^\circ C$)
 T_{Mr} - temperatura média da água de resfriamento ($^\circ C$)

- T_{s_r} - temperatura de saída da água de resfriamento ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{e_r} - temperatura de entrada da água de resfriamento ($^{\circ}\text{C}$)
- U_o - coeficiente global de transferência de calor, referente à área externa do tubo ($\text{W}/\text{m}^2\ ^{\circ}\text{C}$)
- x - coordenada retangular (m)
- α - difusividade térmica (m^2/s)
- β - coeficiente de expansão térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
- ΔT - diferença de temperaturas entre a temperatura média da massa do fluido e a temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$)
- ΔT_b - diferença das temperaturas entre seções transversais de um tubo ($^{\circ}\text{C}$)
- μ - viscosidade do fluido (kg/sm)
- μ_f - viscosidade do fluido, calculada na temperatura do filme (kg/sm)
- μ_w - viscosidade do fluido calculada, na temperatura da superfície de transmissão de calor (kg/sm)
- ρ - densidade do fluido (kg/m^3)

3. ESTUDO NUMÉRICO DO MODELO MATEMÁTICO

Os balanços de energia desenvolvidos na Seção 2.3. do capítulo anterior resultou em um sistema de 51 equações, onde 36 equações são diferenciais e 15 são algébricas. A esse sistema foram adicionadas mais 69 equações de médias aritméticas de pares de temperaturas, vindo a constituir um sistema de 120 equações a 120 incógnitas.

Para a solução desse sistema de equações por meio do CSMP, as derivadas das equações diferenciais tem que ser explicitadas, assim como devem ser explicitadas as incógnitas das equações algébricas, de forma que cada temperatura que não tenha derivada, fique explicitada em uma equação algébrica.

3.1. Passo de Integração Crítico

Para que soluções numéricas estáveis sejam obtidas na resolução de um sistema de equações diferenciais por meio dos métodos de Runge-Kutta e de Euler disponíveis no CSMP, é necessário que não seja ultrapassado certo valor máximo permissível para o passo de integração, que é o "passo crítico", " Δt_c ".

Em um sistema linear, o valor do passo crítico pode ser calculado em função do raio espectral da matriz dos coeficientes das incógnitas.

$$\text{Seja } \frac{dT}{dt} = A T + B \quad (3.1)$$

um sistema linear dado por "n" equações onde "T" é o vetor das incógnitas, "A" a matriz dos coeficientes a_{ij} , e "B" o vetor do lado direito. Tem-se então que o passo crítico de integração " Δt_c " será:

$$\Delta t_c = \frac{2}{\rho(A)} \quad (3.2)$$

para o método Euler (retangular) e

$$\Delta t_c = \frac{3}{\rho(A)} \quad (3.3)$$

para o método de Runge-Kutta, onde $\rho(A)$ é o raio espectral da matriz A.

Como o cálculo de " $\rho(A)$ " é trabalhoso uma aproximação seria considerar-se o raio espectral como sendo igual ao maior elemento em módulo, da diagonal principal da matriz "A", isto é, $\rho(A) = |a_{ii}|_{\text{máx}}$. Assim,

$$\Delta t_c = \frac{2}{|a_{ii}|_{\text{máx}}} \quad (3.4)$$

para o método Euler, e

$$\Delta t_c = \frac{3}{|a_{ii}|_{\text{máx}}} \quad (3.5)$$

para o método de Runge-Kutta.

O sistema de equações do modelo matemático em estudo é não linear devido a variação de propriedades físicas, tais como μ , C_p , ρ e k , com a temperatura. Para estimar " Δt_c ", pode linearizar-se o sistema utilizando-se os valores iniciais das temperaturas e aplicando-se as equações 3.4 e 3.5. Os valores de $|a_{ii}|$ para o sistema de equações do presente modelo foram dessa forma calculados e se encontram na tabela 3.1. Pela observação da tabela 3.1, nota-se que:

$$|a_{ii}|_{\text{máx}} = 1,111 \text{ s}^{-1}$$

e então

$$\Delta t_c = 1,80 \text{ (s)}$$

para o método de Euler, e

$$\Delta t_c = 2,70 \text{ (s)}$$

para o método de Runge-Kutta.

TABELA 3.1 - Valores dos elementos da diagonal principal da matriz dos coeficientes das incôgnitas calculados a partir dos valores iniciais das temperaturas

$ a_{ii} \text{ (s}^{-1}\text{)}$		
$a_{1,1} = 0,024$	$a_{13,13} = 0,213$	$a_{25,25} = 0,385$
$a_{2,2} = 0,026$	$a_{14,14} = 0,217$	$a_{26,26} = 0,385$
$a_{3,3} = 0,053$	$a_{15,15} = 0,232$	$a_{27,27} = 0,400$
$a_{4,4} = 0,081$	$a_{16,16} = 0,250$	$a_{28,28} = 0,417$
$a_{5,5} = 0,125$	$a_{17,17} = 0,286$	$a_{29,29} = 0,435$
$a_{6,6} = 0,125$	$a_{18,18} = 0,294$	$a_{30,30} = 0,435$
$a_{7,7} = 0,126$	$a_{19,19} = 0,312$	$a_{31,31} = 0,454$
$a_{8,8} = 0,156$	$a_{20,20} = 0,322$	$a_{32,32} = 0,555$
$a_{9,9} = 0,172$	$a_{21,21} = 0,322$	$a_{33,33} = 0,714$
$a_{10,10} = 0,182$	$a_{22,22} = 0,357$	$a_{34,34} = 0,714$
$a_{11,11} = 0,201$	$a_{23,23} = 0,385$	$a_{35,35} = 1,000$
$a_{12,12} = 0,204$	$a_{24,24} = 0,385$	$a_{36,36} = 1,111$

3.2. Simplificação do Modelo

Com o modelo completo, isto é, com 36 equações diferenciais o passo de integração crítico requerido seria de aproximadamente 1,8 segundos para o Método de Euler, o que resultaria, para a simulação de uma operação típica de 12 horas, em 24000 passos de integração. Isso se traduziria em elevado tempo de utilização do computador, a custos inviáveis.

Um passo de integração tão pequeno não é necessário para a precisão desejada; assim, seria economicamente vantajoso aumentar-se o passo de integração crítico do sistema. Isso é possível quando se elimina o termo de acumulação de energia interna das equações que apresentam os maiores valores para os elementos da diagonal principal. Essas equações são então transformadas em equações algébricas de estado estacionário.

Para avaliar os erros introduzidos pela transformação de equações diferenciais em equações algébricas foi utilizado o Método de Runge-Kutta com passo de integração variável. Essa sub-rotina permite a escolha de erros absoluto e percentual máximos permissíveis, e ajusta o passo de integração de forma a garantir que os erros numéricos sejam menores que os erros especificados.

Foram analisados tres diferentes sistemas de equações para o modelo, sendo um completo com 36 equações diferenciais e dois com eliminação dos termos de acumulação de energia das equações, com $a_{ii} > 0,200 \text{ s}^{-1}$ (sistema com 10 equações diferenciais) e com $a_{ii} > 0,030 \text{ s}^{-1}$ (sistema com 2 equações diferenciais). Para eliminar erros numéricos, os tres sistemas foram resolvidos pelo método de Runge-Kutta com passo de integração variável, com erro absoluto de $0,0001 \text{ }^\circ\text{C}$ e erro percentual de $0,001\%$, na simulação de um transient de 1500 segundos de duração. A figura 3.1 mostra a curva de variação da potência da Seção de Teste em função do tempo de simulação.

A tabela 3.2. apresenta os valores de Δt_c estimados a partir dos $|a_{ii}|_{\text{m\acute{a}x}}$, para os modelos com 36, 10 e 2 equa \tilde{c} oes di \tilde{f} erenciais. Tamb \tilde{e} m nesta tabela s\~{a}o dados os valores dos passos de integra \tilde{c} ao m\~{a}ximo, m\~{i}nimo e m \tilde{e} dio, utilizados pela sub-rotina do m \tilde{e} todo de Runge-Kutta com passo vari\~{a}vel, (Δt m \tilde{e} dio, Δt m\~{i}nimo e Δt m\~{a}ximo). A tabela 3.2. fornece ainda: os valores da raz\~{a}o entre o tempo de simula \tilde{c} ao da opera \tilde{c} ao e o tempo de CPU (tempo de utiliza \tilde{c} ao da Unidade Central de Processamento do Sistema IBM/370 do IPEN); as temperaturas ao longo do CEA no instante 1500 segundos, e os erros m\~{a}ximos absoluto e percentual encontrados nos valores das temperaturas, tomando-se o modelo com 36 equa \tilde{c} oes diferenciais como padr\~{a}o.

Considerando-se os resultados obtidos pelos modelos simplificados com 2 e com 10 equa \tilde{c} oes diferenciais em rela \tilde{c} ao ao modelo completo com 36 equa \tilde{c} oes diferenciais, conclui-se que o modelo com 10 equa \tilde{c} oes diferenciais \u00e9 o que melhor atende ao compromisso existente entre precis\~{a}o na solu \tilde{c} ao do sistema de equa \tilde{c} oes e custo, referente ao tempo de utiliza \tilde{c} ao do computador.

3.3. Escolha do M \tilde{e} todo de Integra \tilde{c} ao

Como o Δt_c dado pelas equa \tilde{c} oes 3.4. e 3.5 \u00e9 apenas uma estimativa do valor de Δt_c , fez-se um estudo para a determina \tilde{c} ao do passo de integra \tilde{c} ao cr\~{i}tico real dos sistemas com 10 e com 2 equa \tilde{c} oes diferenciais, para o m \tilde{e} todo de Euler.

Calculados pela equa \tilde{c} ao 3.4 os valores estimados para Δt_c foram de 11,0 e de 77,0 segundos para os sistemas com 10 e com 2 equa \tilde{c} oes diferenciais, respectivamente.

Para o sistema com 10 equa \tilde{c} oes diferenciais foram

TABELA 3.2 - Método de Integração: Runge-Kutta com passo de integração variável (erro absoluto = 0,0001°C; erro percentual = 0,0001%)

Tempo de simulação: 1500 segundos

Potência da Seção de Teste variando com o tempo (Figura 3.1)

Nº de equações diferenciais	$ a_{11} _{\text{máx}}$ (s ⁻¹)	Δt_c estimado (s)	Δt médio (s)	Δt_{min} (s)	$\Delta t_{\text{máx}}$ (s)	tempo de	
						simulação	tempo de CPU
36	1,111	2,7	0,60	0,06	1,87		61,2
10	0,182	16,5	2,55	0,23	5,04		272,7
2	0.026	115,4	5,45	1,87	10,91		600,0

Nº de equações diferenciais	Temperaturas no instante 1500 s (°C)										
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁
36	49,17	61,77	51,27	40,81	31,63	44,84	49,18	48,54	30,18	29,33	28,94
10	51,96	64,97	53,82	42,60	32,15	47,40	51,86	51,19	30,43	29,42	29,10
2	57,70	70,99	60,29	46,18	32,26	52,09	57,77	59,95	30,95	29,81	23,38

Nº de equações diferenciais	Máximo erro absoluto (°C)	máximo erro percentual (%)
36	0	0
10	3,20	5,76
2	9,22	17,59

executados programas de simulação com passos de integração iguais a 11,0; 4,5; 4,0 e 3,0 segundos utilizando-se o método de Euler. Observou-se que para o passo de integração, Δt , igual a 11 segundos, as soluções foram instáveis, resultando em temperaturas negativas, o mesmo acontecendo para $\Delta t = 4,5$ s. Para $\Delta t = 4$ s e para $\Delta t = 3$ s, foram obtidas soluções estáveis. Conclui-se então que o valor do passo crítico de integração para o método de Euler, do sistema com 10 equações diferenciais é tal que: $4,0s < \Delta t_c < 4,5s$.

De maneira análoga, para o sistema com 2 equações diferenciais foram executados programas com passos de integração iguais a 77,60, 45 e 40 segundos, também utilizando-se o método de Euler. O passo crítico, dessa forma encontrado, resultou em: $45s < \Delta t_c < 40s$.

Conclui-se portanto que os valores de Δt_c previstos pela equação 3.4, são aproximadamente duas vezes maiores que os valores reais de Δt_c encontrados para os sistemas com 2 e com 10 equações diferenciais. Mesmo assim, as estimativas fornecidas pela equação 3.4 são úteis para poder-se avaliar a ordem de grandeza dos referidos valores.

Para o sistema com 10 equações diferenciais, a solução dada pelo método de Euler com $\Delta t = 4,0s$ foi comparada com a solução fornecida pelo método de Runge-Kutta com passo de integração variável (erro absoluto de $0,0001^{\circ}C$ e erro percentual de $0,0001\%$). Para tanto, foi simulada uma operação com 8100 segundos de duração e onde a potência da Seção de Teste variou com o tempo conforme mostra o gráfico da figura 3.2. Os resultados obtidos para as temperaturas no instante 1080s são mostrados na tabela 3.3.

Como as diferenças entre as temperaturas calculadas

pelos métodos de Euler e de Runge-Kutta foram pequenas e a razão entre o tempo de simulação e o tempo de CPU para o método de Euler é quase 10 vezes maior do que para o método de Runge-Kutta, conclui-se que o método de Euler fornece resultados suficientemente precisos a um custo aproximadamente 10 vezes menor.

TABELA 3.3 - Sistema com 10 equações diferenciais

Tempo de Simulação: 8100 segundos

Potência da Seção de Teste variando com o tempo (Figura 3.2)

Método de integração	tempo de simulação / tempo de CPU	Temperaturas no instante 1080s (°C)										
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁
Runge-Kutta passo variável erro absoluto = 0,0001°C erro percentual = 0,0001%	376,7	57,36	75,96	60,08	45,68	32,86	51,68	57,51	56,68	31,15	29,75	29,33
Euler Δt = 4,0s	3600,0	57,91	76,57	61,07	46,05	32,99	52,03	58,20	57,33	31,21	29,79	29,34

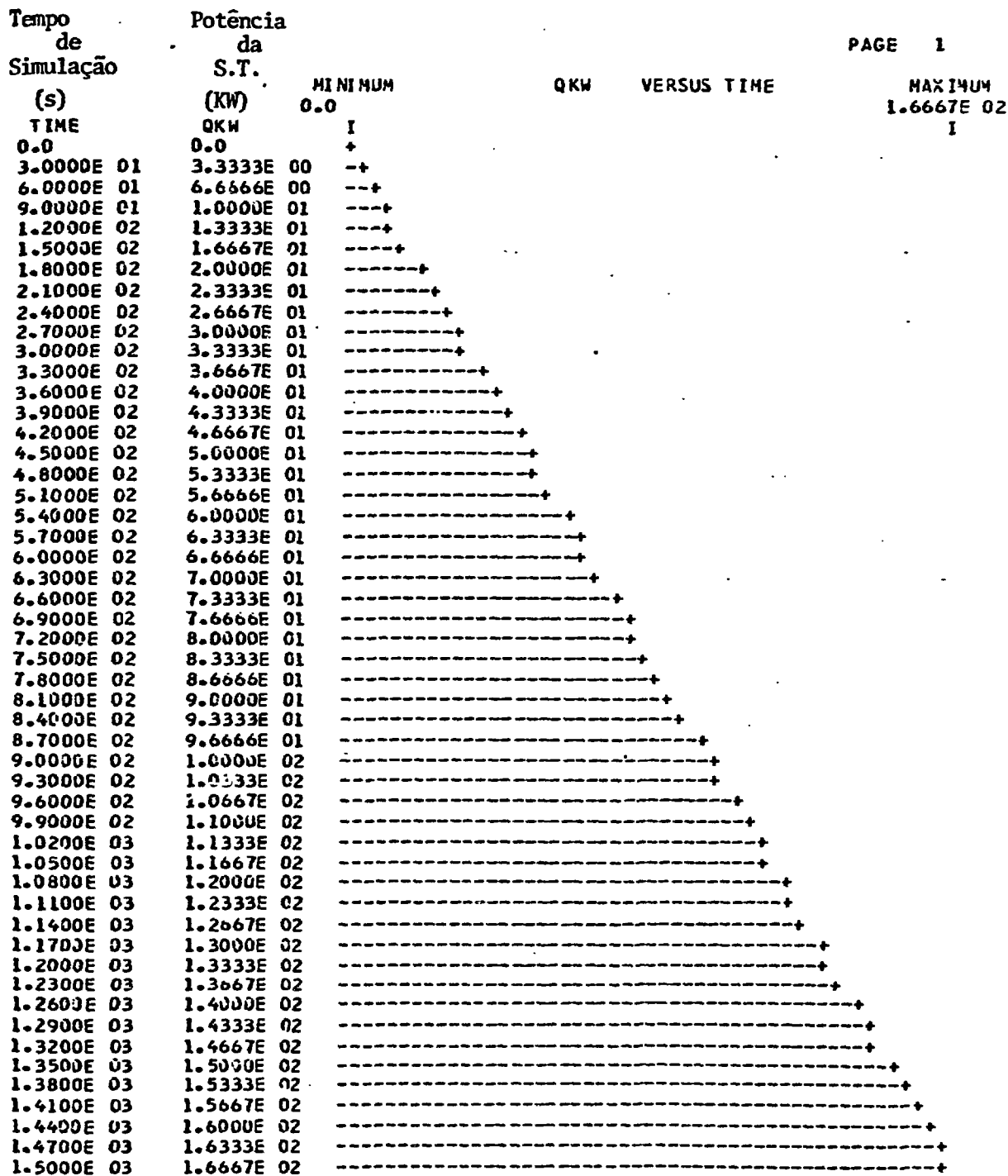


Figura 3.1

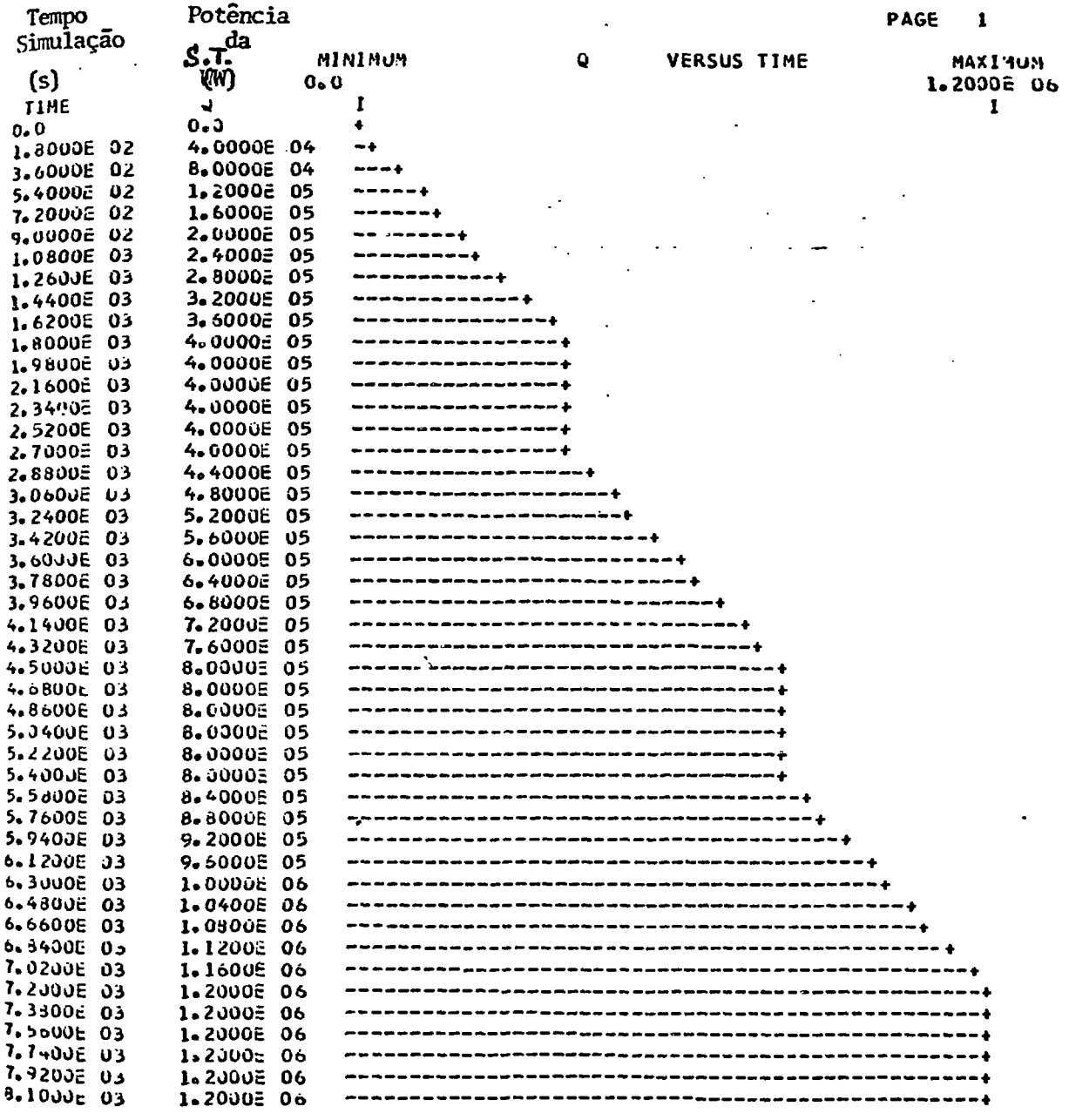


Figura 3.2

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo, foi feita uma análise dos resultados obtidos por meio do presente modelo; inicialmente fez-se uma simulação com o modelo, tendo este sido simplificado, a fim de compará-lo com os dados de projeto do CEA. A seguir, uma nova simulação foi feita já com o modelo definitivo, para uma operação típica do Circulador Experimental de Água.

4.1. Comparação com Valores de Projeto

Para que pudesse ser comparado com o projeto do CEA, uma vez que não se dispõe de resultados experimentais, o presente modelo foi simplificado, tendo sido eliminados do equacionamento os termos de velocidade de acumulação de energia interna, os balanços de energia nas tubulações e nas carcaças dos equipamentos, fazendo com que o modelo se tornasse de estado estacionário.

O sistema de equações passou a ser constituído apenas por equações algébricas não lineares. Dessa forma, o programa foi executado em 1,25 minutos (tempo de CPU, ou seja, tempo de utilização da Unidade Central de Processamento do Sistema IBM/370 do IPEN).

Os valores das temperaturas do estado estacionário ao longo do CEA, para a plena potência da Seção de Teste (1.300 kw), foram tabelados (tabela 4.1) e comparados com os valores calculados no projeto do CEA (ref. 7). Por esta comparação verifica-se que os maiores erros absolutos ($4,83^{\circ}\text{C}$ e $4,03^{\circ}\text{C}$), são referentes à temperaturas de entrada e saída da bomba P-101 (T_8 e T_1). Esses dois maiores erros absolutos são explicados pelo fato do balanço energético feito no projeto do CEA não ter levado em conta a ener

gia transmitida à água pela bomba P-101, ao contrário do que foi feito no modelo.

Outra diferença entre o procedimento realizado na elaboração do modelo em relação ao projeto diz respeito às correlações utilizadas para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção nos resfriadores. Porém os valores obtidos para os coeficientes globais de transferência de calor no projeto e no modelo não diferem em mais que 8%.

Como o erro percentual máximo encontrado na tabela 4.1 não ultrapassa 2,5% pode-se concluir que apesar das diferenças acima citadas, os resultados obtidos por ambos são concordantes.

TABELA 4.1

	Valor de Projeto (°C)	Valor calculado pelo Modelo (°C)	Erro Absoluto (°C)	Erro Percentual (%)
T ₁	195	199,83	4,83	2,48
T ₂	285	283,95	1,05	0,37
T ₃	216	218,60	2,60	1,20
T ₄	124	123,38	0,62	0,50
T ₅	50	50,92	0,92	1,84
T ₆	161	164,70	3,70	2,30
T ₇	200	203,41	3,41	1,71
T ₈	195	199,03	4,03	2,07
T ₉	50	48,98	1,02	2,04
T ₁₀	40	40,50	0,50	1,25
T ₁₁	36	35,83	0,17	0,47

OBS.: as temperaturas T₁ a T₁₁ estão definidas no capítulo 1, figura 1.1.

4.2 SIMULAÇÃO DE UMA OPERAÇÃO TÍPICA DO CEA

Nesta simulação a curva da potência da Seção de Teste em função do tempo foi suposta variando em degraus; ao utilizar-se essa curva o objetivo é aproximá-la do que seria uma curva de potência real e construí-la de forma a não permitir que em nenhum ponto do CEA hajam variações de temperatura superiores a 38°C/hora , que é o limite permitido para que não surjam tensões térmicas capazes de provocar danos nos equipamentos

As figuras de números 4.1 a 4.7 mostram as curvas de temperaturas da água de processo em alguns pontos do CEA, superpostas às de potência da Seção de Teste. Nota-se que as temperaturas seguem a curva de potência com um atraso de aproximadamente 15 minutos. Pela inspeção desses gráficos, pode-se prever o tempo necessário para se atingir estado estacionário, e ainda o tempo de desligamento para que o resfriamento seja corretamente realizado, sendo estas informações de grande utilidade no planejamento da operação do CEA, bem como o fato de se poder obter valores das temperaturas para uma dada potência através dos valores do estado estacionário.

Outro campo de aplicação do modelo são possíveis modificações que se deseje fazer no Circulador Experimental de Água, as quais poderão ser estudadas a priori.

(1) - TEMPERATURA NA SAIDA DA BOMBA "T1" (°C)
(9) - POTÊNCIA DA SEÇÃO DE TESTE (KWx10)

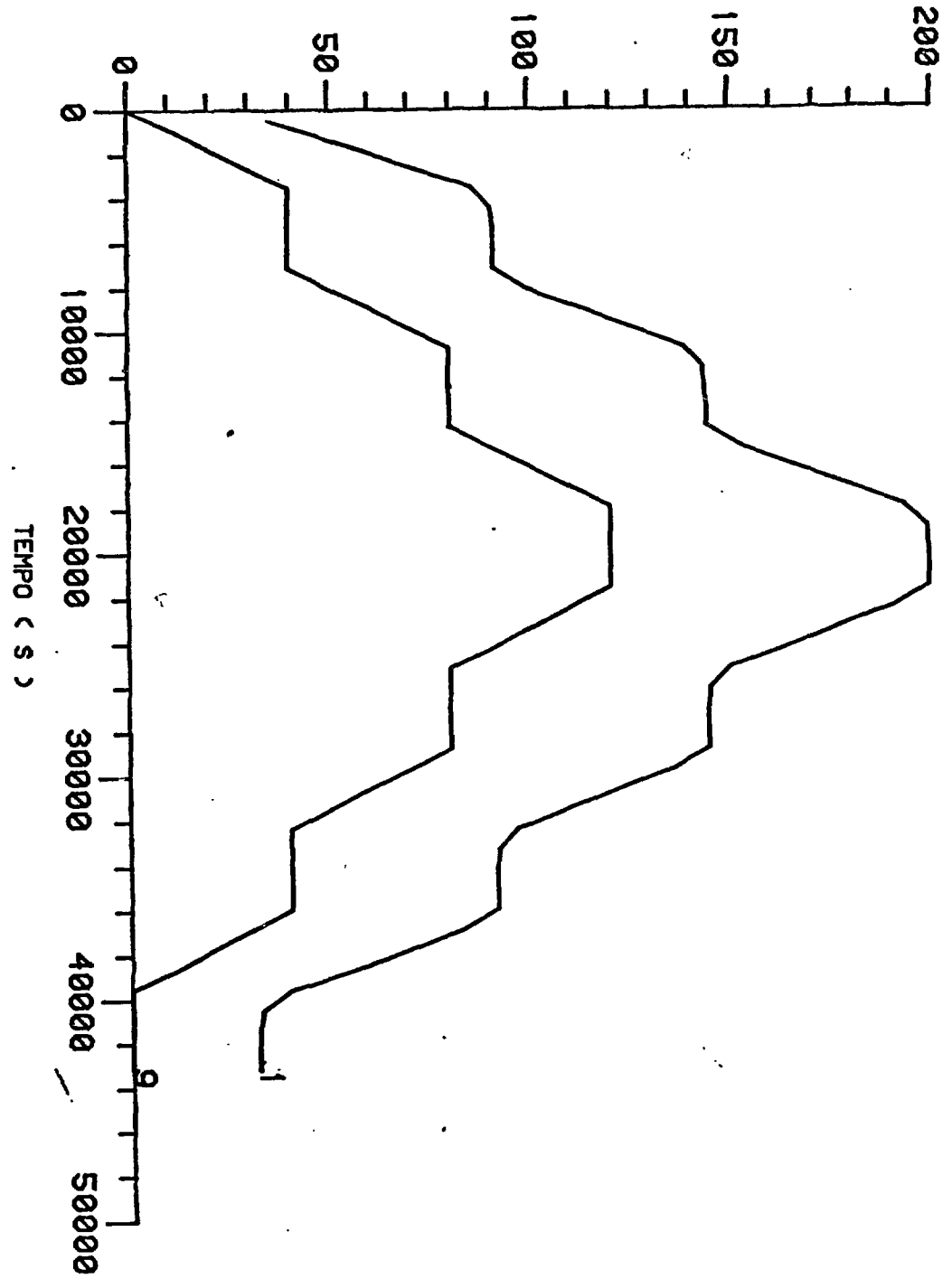


FIGURA 4.1

(2) - TEMPERATURA NA SAIDA DA S.T. "T2" (°C)

(9) - POTÊNCIA DA SEÇÃO DE TESTE (KWx10)

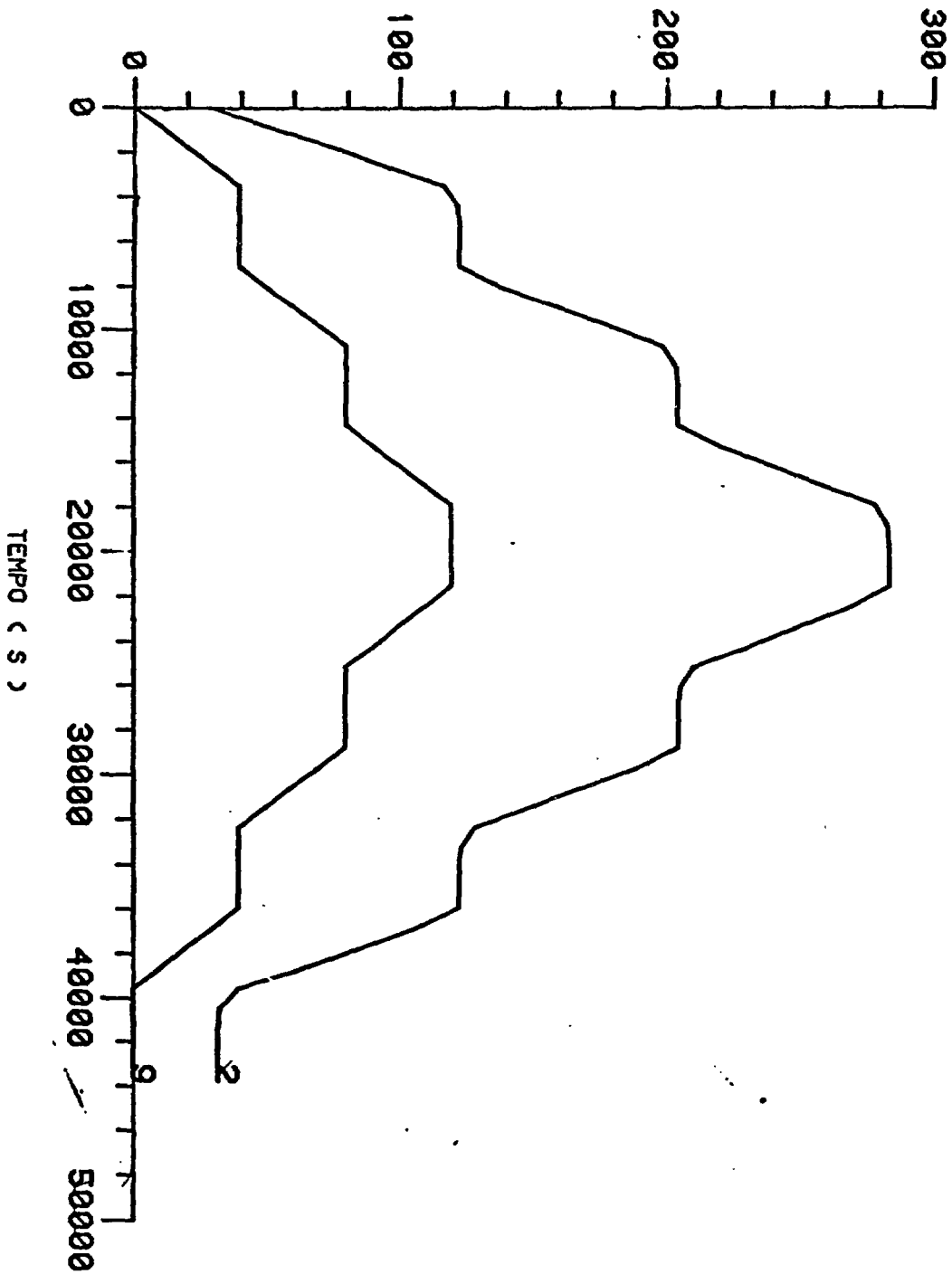


FIGURA 4.2

(3) - TEMPERATURA NA SAIDA DO C-101 "T3" (°C)

(9) - POTÊNCIA DA SEÇÃO DE TESTE (KWx10)

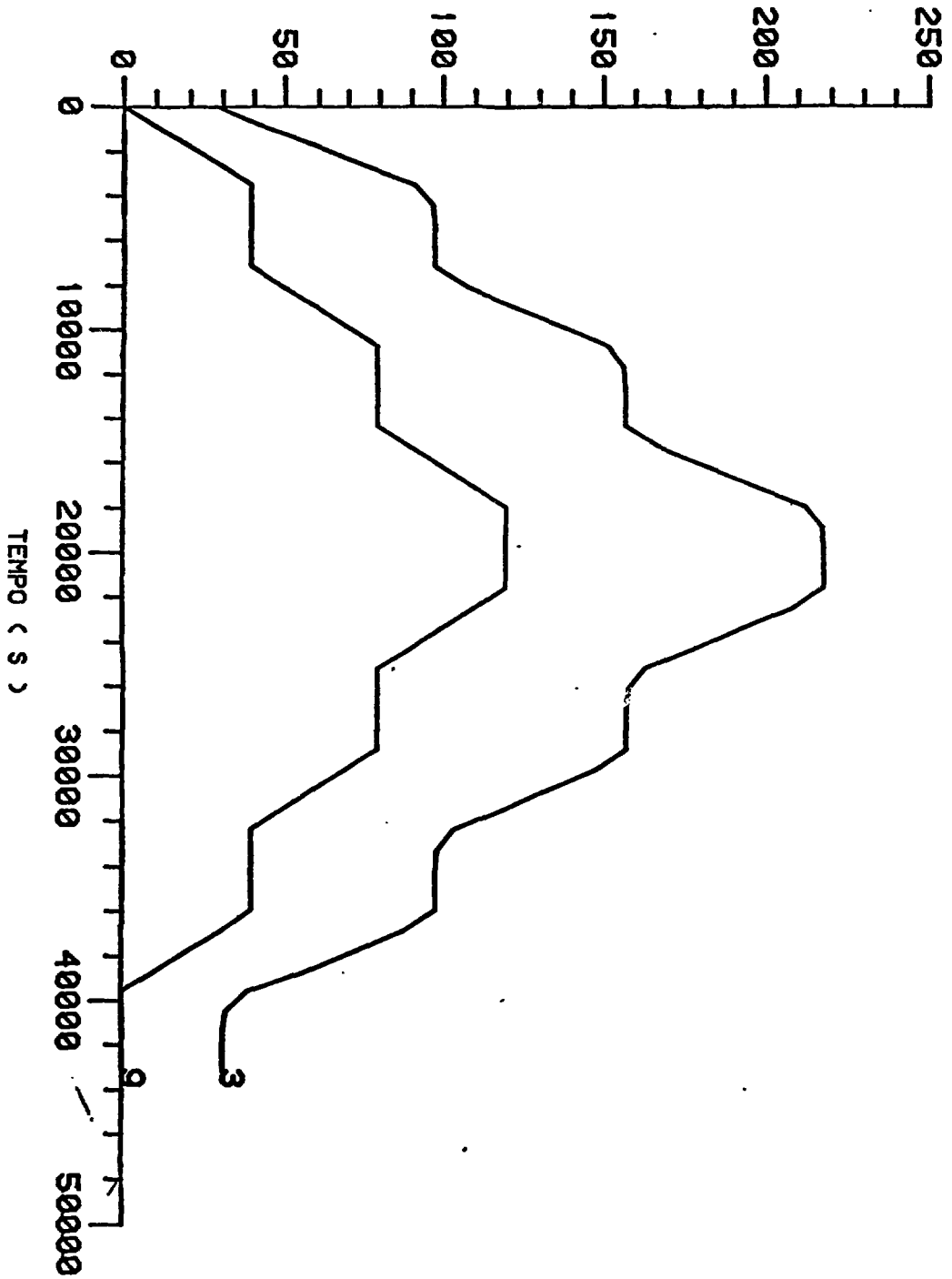


FIGURA 4.3

(2) - TEMPERATURA NO SECUNDÁRIO DO C-101 "T9" (°C)

(6) - POTÊNCIA DA SEÇÃO DE TESTE (KWx10)

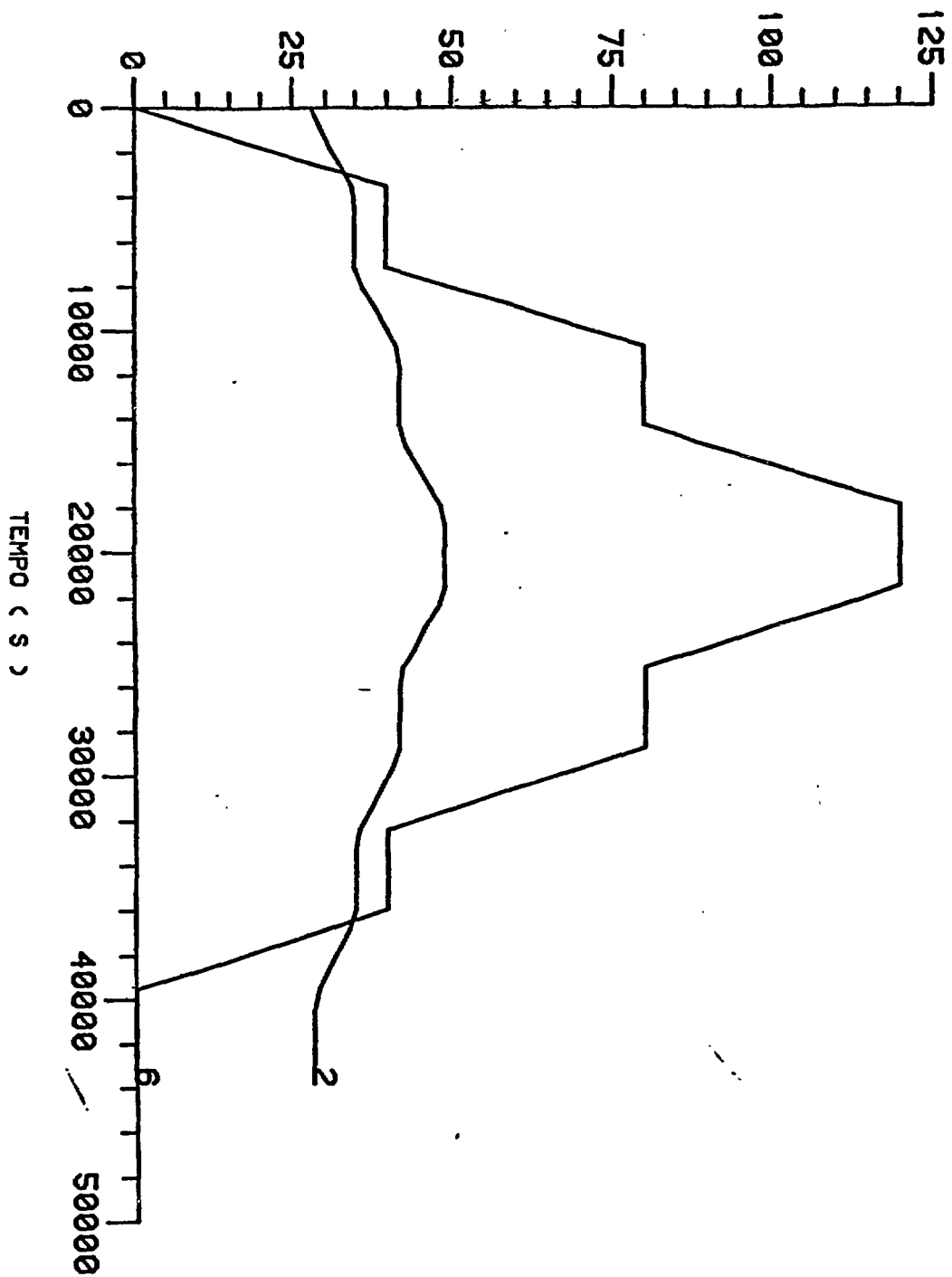


FIGURA 4.4

(4) TEMPERATURA NA SAIDA DO C-102 "T4" (°C)

(9) POTÊNCIA DA SEÇÃO DE TESTE (KWx10)

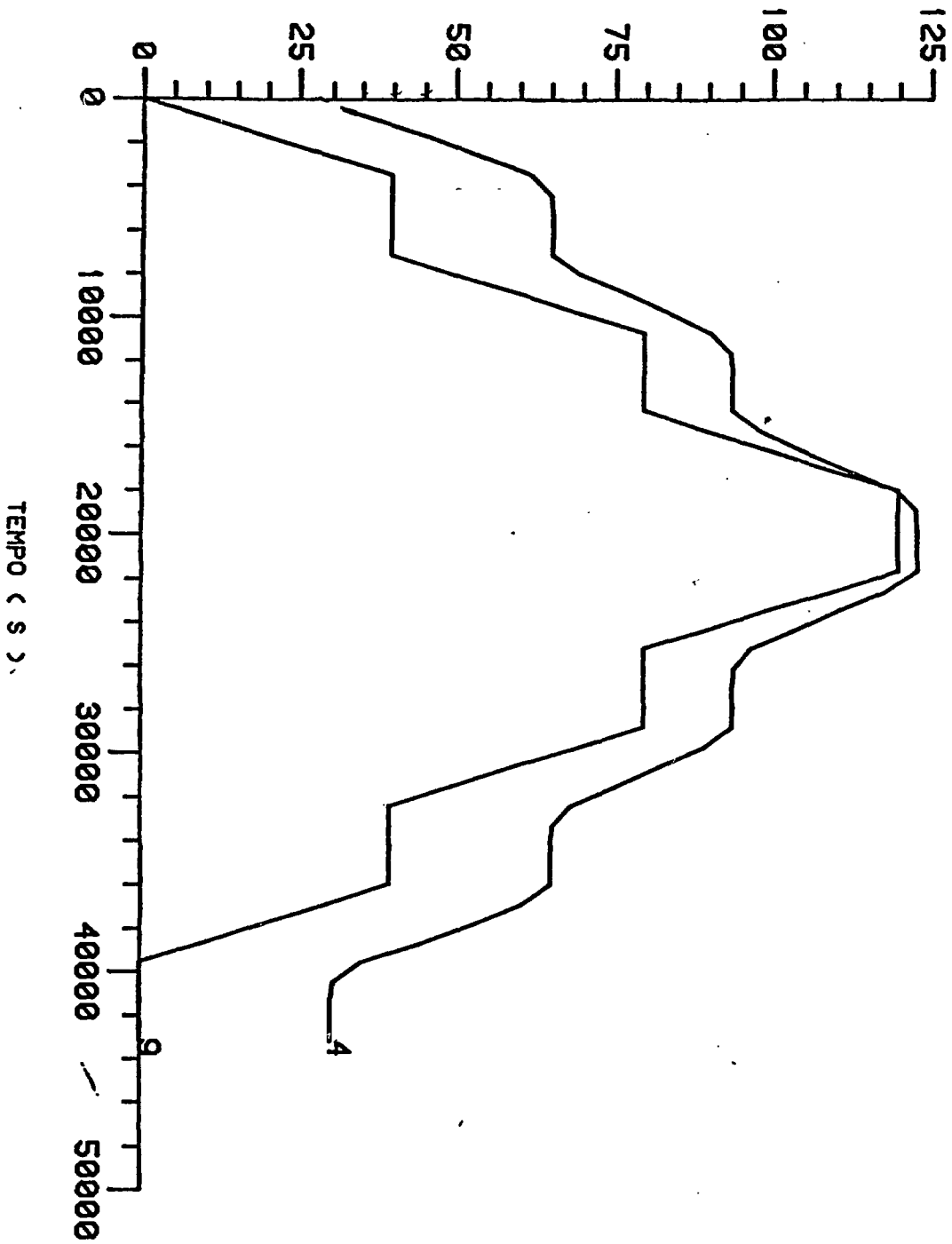


FIGURA 4.5

(3) - TEMPERATURA NO SECUNDÁRIO DO C-102 °T10° (°C)
(6) - POTÊNCIA DA SEÇÃO DE TESTE (KWx10)

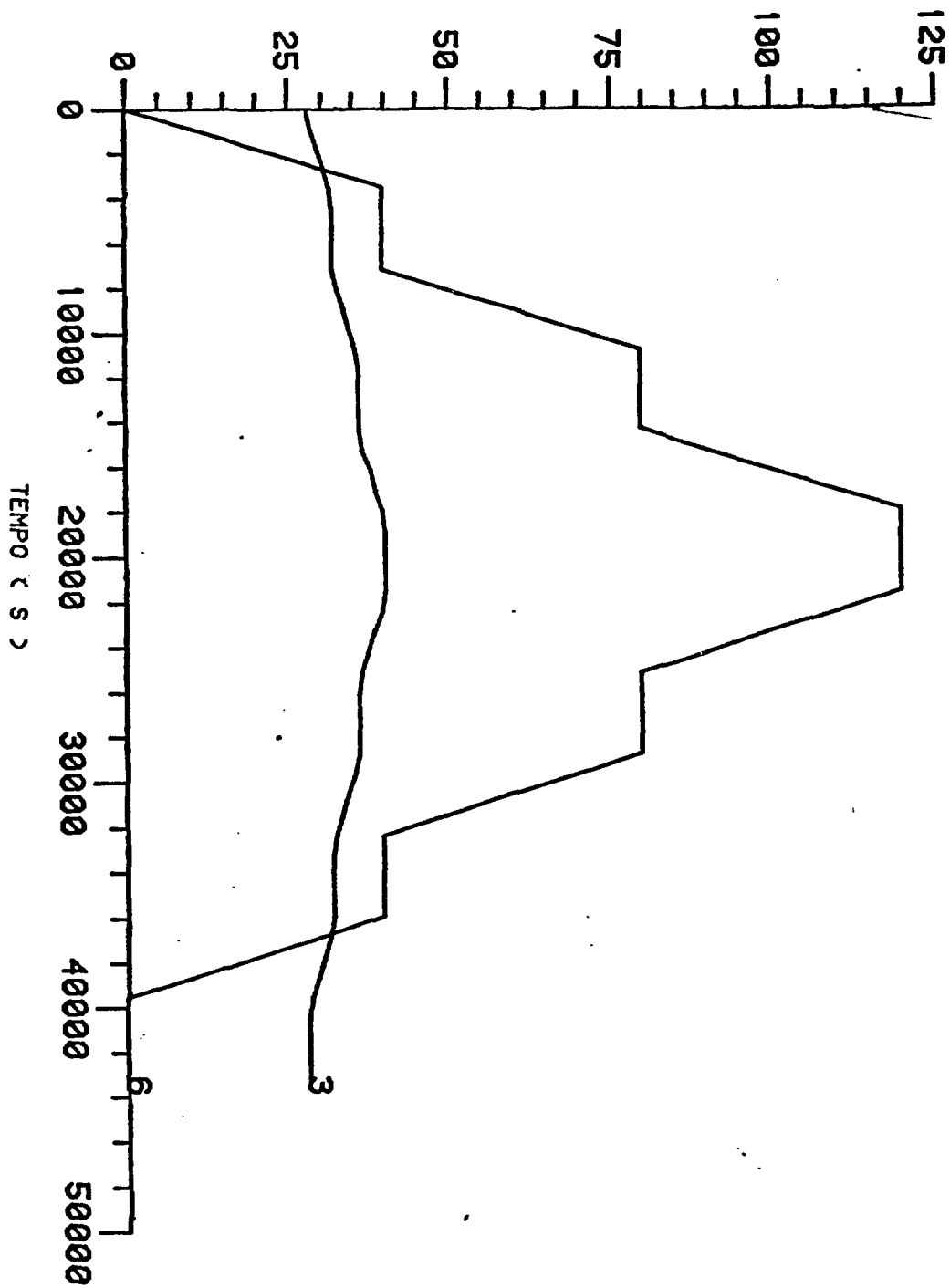


FIGURA 4.6

(5) - TEMPERATURA NA SAIDA DO C-103 "T5" (°C)
(9) - POTÊNCIA DA SEÇÃO DE TESTE (KWx10)

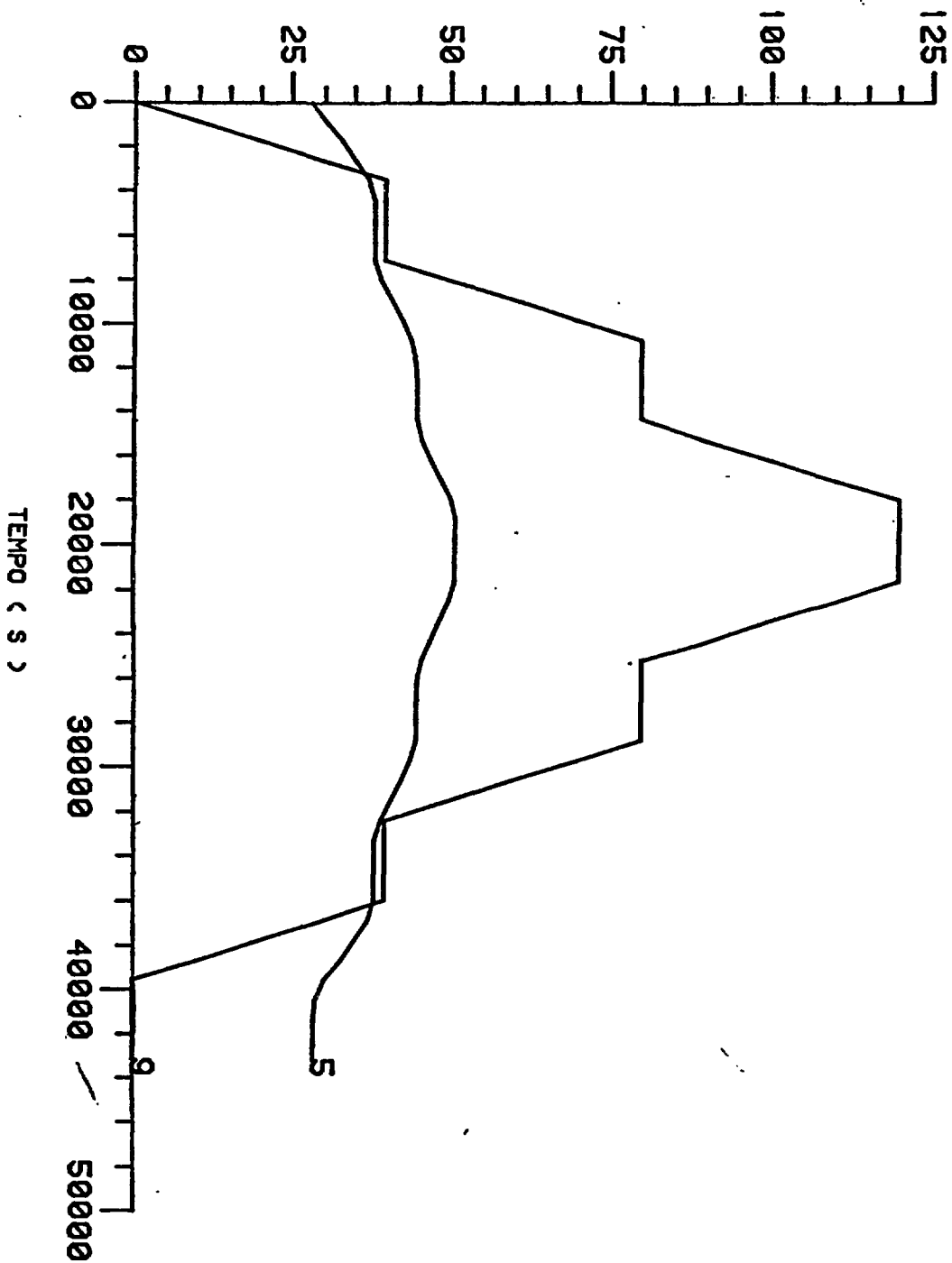


FIGURA 4.7

CONCLUSÕES

Foi feito um modelo de simulação de transientes térmicos no CEA do IPEN, a partir de balanços de energia aplicados a vários elementos do Circulador.

O sistema de equações obtido foi modificado, sendo que algumas equações diferenciais foram transformadas em equações algébricas de forma a permitir a diminuição do tempo de processamento do programa no computador.

O melhor resultado foi obtido para o modelo com 10 equações diferenciais, utilizando-se o método de Euler com passo de integração de 4 segundos, onde a relação entre o tempo de simulação e o tempo de CPU é igual a 3600.

Foi simulado um transiente típico incluindo partida, estado estacionário e desligamento, mostrando a utilização do modelo na simulação do Circulador.

Trabalhos futuros poderão incluir comparação das temperaturas computadas pelo modelo com as experimentais, quando estas últimas estiverem disponíveis.

Ao modelo poderão ser acrescentados cálculos de transientes de velocidade e de pressão no CEA, utilizando balanços de quantidade de movimento. Numa segunda etapa, a operação do CEA para simulação de reatores do tipo BWR, envolvendo escoamento em regime bifásico, também poderá ser modelada.

APÊNDICE I

CONTINUOUS SYSTEM MODELING PROGRAM - CSMP (ref. 6)

1. INTRODUÇÃO

O S/360 Continuous System Modeling Program (S/360 CSMP) é um programa que foi desenvolvido pela IBM (International Business Machine) com o intuito de facilitar a simulação digital de processos contínuos.

O programa possui uma linguagem orientada de tal forma que permite a solução de problemas de simulação, diretamente pela representação em diagrama de blocos ou simplesmente por um sistema de equações diferenciais e algébricas.

2. DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA

O programa é dotado de 34 blocos funcionais, através dos quais os componentes de um sistema contínuo podem ser representados. Além desses 34 blocos, o CSMP permite que novos blocos funcionais sejam definidos.

O CSMP aceita a maioria dos comandos Fortran, bem como as funções de biblioteca dessa linguagem.

Os comandos de entrada funcionam como elementos de ligação entre os diversos blocos funcionais, sendo que uma rotina tradutora converte os comandos CSMP para uma sub-rotina Fortran (sub-rotina UPDATE), a qual é então compilada e executada alternadamente com a rotina de integração, de forma a executar a simulação.

Os formatos de entrada e saída de dados são padroni

zados no CSMP, havendo a possibilidade da saída de dados ser feita sob a forma de tabelas ou gráficos.

3. ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DO CSMP

- Os comandos CSMP podem ser escritos em qualquer ordem e, a critério do usuário, podem ser automaticamente ordenados ou não por um sistema que estabelece o fluxo correto de informações.

- Possibilidade de inicializar variáveis ou parâmetros, ou seja, indicar um grupo de comandos de estrutura que devam ser executados apenas uma vez, no início da simulação, permitindo uma maior eficiência na execução do programa, já que os cálculos computacionais serão realizados apenas uma vez e não a cada iteração.

- 95% das operações são executadas em FORTRAN IV, nível G, e apenas 5% em ASSEMBLER SYSTEMS/360.

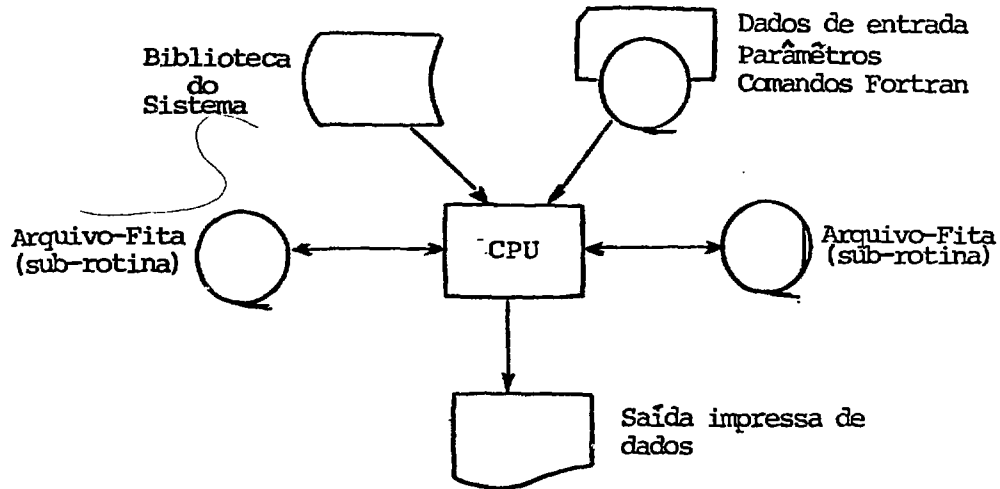
- Todos os cálculos são feitos com simples precisão e ponto aritmético flutuante.

- O programa requer um mínimo de 102 k bytes de memória.

- Entrada de dados sob a forma de tabelas, havendo a possibilidade de utilização dos valores tabelados, através de interpolação quadrática ou linear.

Do ponto de vista do usuário e do operador, o programa funciona como um único "job", apesar de se tratar de programa de passos múltiplos.

ESQUEMA GERAL DO SISTEMA CSMP



4. MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO

Os métodos de integração disponíveis no CSMP são, em ordem decrescente de complexidade os seguintes:

- Runge-Kutta de 4^a ordem
- Milne de 5^a ordem
- Simpson
- Trapezoidal
- Adams de 2^a ordem
- Retangular

sendo que os dois primeiros possuem intervalo de integração ajustável pelo sistema, segundo um critério de erro pré-estabelecido; além disso, pode-se utilizar Runge-Kutta de 4^a ordem com passo fixo, da mesma forma que os métodos restantes.

A seleção de um método de integração e do intervalo a ser usado nesse cálculo, em determinado estudo de simulação, não deve ser feita ao acaso, mas sim após considerações de diversos fatores interrelacionados.

O objetivo a ser alcançado é o da escolha da combinação da rotina de integração e do intervalo de integração que

proporcionem a mais rápida execução do programa, dentro dos critérios de precisão requeridos para os propósitos do estudo de simulação, e que garanta ainda a obtenção de dados de saída suficientes para uma fácil interpretação dos resultados.

Em geral, com o aumento da complexidade do método de integração, o tempo de computador requerido por passo de integração aumenta. Por outro lado, a estabilidade do método numérico também aumenta, permitindo a utilização de passos de integração maiores.

Basicamente, dois tipos de método de integração são disponíveis no CSMP: passo fixo e passo variável.

Os métodos de passo variável (Milne e Runge-Kutta), ajustam o intervalo de integração de acordo com os critérios de erro estabelecidos pelo usuário.

A estimativa de erro é feita pelo cálculo de $Y(t+\Delta t)$ através de duas fórmulas diferentes, com termos de erros complementares. A vantagem desse método é que ele alcança o grau de precisão desejado com o máximo valor possível de passo de integração.

Se nenhum método de integração é especificado, o programa assume automaticamente o de Runge-Kutta, com passo de integração variável. Este método é geralmente uma boa escolha inicial para a execução de um programa. É aconselhável a escolha de um intervalo de integração bem pequeno, a princípio, para que seja garantida a estabilidade da solução numérica. Após obtida grande familiaridade com o modelo, deve ser encontrada a combinção ótima entre intervalo e método de integração para o grau de precisão e tempo de execução desejados.

5. ESTRUTURA DO MODELO

O núcleo do sistema de simulação contínua é o mecanismo computacional para a solução de equações diferenciais que representam a dinâmica do modelo.

Usualmente, contudo, existem também cálculos computacionais que devem ser realizados antes de cada execução do programa. Para satisfazer esses requisitos, a formulação geral do modelo é dividida em três segmentos: Initial, Dynamic e Terminal, os quais descrevem os cálculos computacionais a serem realizados antes, durante e após cada simulação.

O segmento Initial é exclusivo para a computação de valores de condições iniciais, constantes e daqueles parâmetros que o usuário prefere expressar em termos de outros mais básicos. Em muitos problemas de simulação, esse segmento é dispensável, sendo, portanto, opcional a sua utilização.

O segmento Dynamic é normalmente o mais extenso do modelo. Ele inclui uma completa descrição da dinâmica do modelo, bem como cálculos computacionais desejados durante a execução do programa.

Os comandos estruturais dentro do segmento Dynamic são, em geral, uma mistura de comandos CSMP e Fortran.

O segmento Terminal é usado para os cálculos que devem ser feitos após a execução completa de uma simulação, sendo o seu uso opcional.

6. TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO

A simulação é uma técnica aproximada e, como tal, ao

fazer-se uso dela, deve-se estar cientes das aproximações feitas em cada modelo de simulação em particular.

É muito importante ter-se exata noção das aproximações realizadas, de forma a que possa-se avaliar seus efeitos e então interpretar corretamente os resultados obtidos.

O modelo de simulação é desenvolvido pela preparação de comandos CSMP de estrutura, comandos de dados e comandos de controle, de forma a representar a visualização do fenômeno em estudo. A preparação do sistema de equações diferenciais representa a primeira etapa crítica para a aplicação da técnica de simulação com sucesso.

A preparação de comandos CSMP não requer muito tempo nem atenção especial, mas o mecanismo que envolve a simulação deve ser feito cuidadosamente, sendo que o programador deve estar absolutamente certo de que o sistema de equações diferenciais representa corretamente o fenômeno em estudo.

A sequência dos comandos CSMP pode ser qualquer, já que o programa automaticamente estabelece a ordem correta para o fluxo de informações, sendo contudo, essa característica opcional. Assim, a sequência correta garante que cada valor de comando de saída no tempo "t" seja calculado tomando por base valores de comandos de entrada no tempo "t". Uma sequência incorreta poderia provocar uma defasagem entre esses valores, o que poderia ocasionar prejuízos na estabilidade e precisão da solução numérica.

As integrações são realizadas entre iterações, e, portanto, todas as integrais devem ter valores conhecidos no princípio de cada iteração.

7. CONCLUSÃO

Dentre as inúmeras facilidades apresentadas pelo CSMP, deve-se salientar aquelas que fizeram com que se escolhesse esse método para a elaboração do modelo de simulação do qual este trabalho é objeto.

- facilidade na entrada e saída de dados,
- o programa pode ser escrito diretamente, a partir de equações diferenciais,
- possibilidade de utilização de comandos Fortran,
- diversas opções de métodos de integração,
- saída de gráficos e tabelas com formatos padronizados,
- 34 blocos funcionais já existentes e possibilidade de definição de novos blocos funcionais.

APÊNDICE II

PROGRAMAÇÃO E LISTAGEM DO PROGRAMA

- Programação

A programação do modelo matemático em CSMP foi estruturada em dois segmentos: segmento INITIAL e segmento DYNAMIC.

No segmento INITIAL foram atribuídos valores iniciais a todas as temperaturas e definidos os valores de parâmetros, tais como: volumes, áreas, diâmetros, comprimentos, massas etc. Ainda nesse segmento foram montadas as tabelas das propriedades físicas da água em função da temperatura para as pressões de 1 atm e de 70 atm; essas tabelas foram definidas por meio de comandos FUNCTION do CSMP (ref.6).

Para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção, as fórmulas das correlações foram escritas de maneira a possibilitar economia de tempo de computação pela definição de termos que são exclusivamente função da temperatura; os referidos termos foram então tabelados utilizando-se comandos FUNCTION. Assim, por exemplo, a equação 2.10 de Dittus-Boelter assumiu a seguinte formulação:

$$h_i = C_{km} \frac{0,023 G^{0,8}}{D^{0,2}}$$

onde

$$C_{km} = \frac{k_f^{0,67} C_{p_f}^{0,33}}{\nu_f^{0,47}}$$

os valores C_{km} em função da temperatura foram previamente calculados e tabelados para 1 atm e 70 atm de pressão. Procedimento análogo foi empregado para o cálculo dos demais coeficientes de transferência de calor por convecção.

As curvas de potência da Seção de Teste e potência da bomba P-101, em função do tempo, são também fornecidas ao programa sob a forma de tabelas, no segmento INITIAL.

No segmento DYNAMIC são feitas as leituras de dados nas tabelas, calculados os parâmetros que variam com o tempo e é estabelecido o sistema de equações algébricas e diferenciais a ser solucionado utilizando-se o método de integração desejado.

O segmento DYNAMIC foi definido como sendo NOSORT (ref. 6), ou seja, a ordem de solução do sistema de equações obedece a ordem na qual as equações foram introduzidas no programa.

LISTAGEM DO PROGRAMA

CONTINUOUS SYSTEM MODELING PROGRAM

PROBLEM INPUT STATEMENTS

INITIAL

```

INVCN T21R3=28.00,T21T1=28.00,T32T1=28.00,
TMT2=28.00,T21T2=28.00,T32T2=28.00,
TMT3=28.00,T21T3=28.00,T32T3=28.00,
TMT4=28.00,T21T4=28.00,T32T4=28.00,
TMT5=28.00,T21T5=28.00,T32T5=28.00,
TMT6=28.00,T21T6=28.00,T32T6=28.00,
TMT7=28.00,T21T7=28.00,T32T7=28.00,
T18=28.00,T91=28.00,T111=28.00,T21=28.00,T21ST=28.00,
T1=28.00,T2=28.00,T3=28.00,T4=28.00,T5=28.00,T6=28.00,T7=28.00,
T8=28.00,T9=28.00,T10=28.00,T11=28.00,T181=28.00,T182=28.00,
T2T83=28.00,T3T84=28.00,T7T85=28.00,T8T86=28.00,T1T87=28.00,
TP1R1=28.00,TP2R1=28.00,TP3R1=28.00,TP1R2=28.00,TP2R2=28.00,
TP1R3=28.00,TP2R3=28.00,TP188=28.00,TP288=28.00,TP1ST=28.00,
TP2ST=28.00,TP3ST=28.00,TP1T1=28.00,TP2T1=28.00,TP3T1=28.00,
TP1T2=28.00,TP2T2=28.00,TP3T2=28.00,TP1T3=28.00,TP2T3=28.00,
TP3T3=28.00,TP1T4=28.00,TP2T4=28.00,TP3T4=28.00,TP1T5=28.00,
TP2T5=28.00,TP3T5=28.00,TP1T6=28.00,TP2T6=28.00,TP3T6=28.00,
TP1T7=28.00,TP2T7=28.00,TP3T7=28.00

```

```

PARAMETER M1PT=4.47,M2PT=1.47,M3PT=3.00,M4PT=4.32,M5PT=0.79,
M6PT=0.15,M7PT=0.64,M8PT=0.68,M9PT=1.32,M11PT=10.83,
M12PT=5.00,M13PT=1.39,
VAG1R1=150.2E-3,VAG2R1=22.9E-3,VAG1R2=11.2E-3,
VAG2R2=60.5E-3,VAG1R3=5.421E-3,VAG2R3=19.039E-3,
VAG88=5.000E-3,VAGST=29.68E-3,VAGT1=4.752E-2,
VAGT2=1.195E-2,VAGT3=1.738E-2,VAGT4=1.746E-2,
VAGT5=8.596E-3,VAGT6=2.337E-2,VAGT7=7.340E-3,
DP1R1=29.85E-2,DP2R1=32.35E-2,DP3R1=47.59E-2,
DP1R2=20.27E-2,DP2R2=21.91E-2,DP1ST=9.720E-2,
DP2ST=11.43E-2,DP3ST=26.67E-2,DP188=7.980E-2,
DP288=9.98E-2,
DINTR1=0.0157,DINTR2=0.0157,DINTR3=0.0157,
DP1R3=3.51E-2,DP2R3=4.22E-2,DEQ1R1=1.40E-2,
DEQ2R2=2.41E-2,DEQ2R3=4.54E-2,C11=0.133,C12=0.184,
DEXTR1=0.019,DEXTR2=0.019,DEXTR3=0.019,
AP1=3.874,AP2=1.979,AP3=0.712,AP1R1=2.4506,
AP2R1=2.6686,AP3R1=4.0395,AP1R2=1.5920,AP2R2=1.7208,
AP1R3=3.0895,AP2R3=3.7149,
AP1ST=1.2215,AP2ST=1.4363,AP3ST=3.3515,AP188=0.2507,
AP288=0.3135,
DP1T1=7.37E-2,DP2T1=8.89E-2,DP3T1=16.51E-2,
DP1T2=4.92E-2,DP2T2=6.05E-2,DP3T2=13.67E-2,
DP1T3=4.92E-2,DP2T3=6.05E-2,DP3T3=16.21E-2,
DP1T4=4.92E-2,DP2T4=5.05E-2,DP3T4=13.67E-2,
DP1T5=7.37E-2,DP2T5=8.89E-2,DP3T5=16.51E-2,
DP1T6=9.72E-2,DP2T6=11.43E-2,DP3T6=19.05E-2,
DP1T7=4.92E-2,DP2T7=6.05E-2,DP3T7=13.67E-2,
STETR1=6.373E-3,STETR2=5.072E-3,STETR3=6.800E-4,
ASTTR1=4.868E-3,ASTTR2=1.948E-3,ASTTR3=1.95E-4,
AP1T1=2.579,AP2T1=3.111,AP3T1=5.778,
AP1T2=0.875,AP2T2=1.198,AP3T2=2.708,
AP1T3=1.413,AP2T3=1.738,AP3T3=4.656,
AP1T4=1.420,AP2T4=1.746,AP3T4=3.945,
AP1T5=0.467,AP2T5=0.563,AP3T5=1.045,
AP1T6=0.962,AP2T6=1.131,AP3T6=1.885,
AP1T7=0.597,AP2T7=0.734,AP3T7=1.658,
MR1=1352.,MR2=518.,MST=92.0,MR8=236.,MR3=345.,
MISJ1=54.20,MISOST=40.91,
MTU81=177.58,MTU82=49.84,MTU83=98.86,MTU84=71.15,

```

```

MTU85=31.47,MTU86=71.89,MTU87=29.91,MISOT1=37.98,
MISOT2=16.69,MISOT3=36.42,MISOT4=24.31,MISOT5=6.87,
MISOT6=12.89,MISOT7=10.22,
CPAC=460.47,CPACC=473.02,CPSC=1000.88,CPLR=837.40,
FT1=0.99,FT2=0.99,TIN=28.00,TAR=23.00,
LVT1=3.344,LVT2=7.796,LVT3=3.870,LVT4=2.435,LVT5=3.398,
LHT3=5.744,LHT4=5.392,LHT5=3.794,LHT6=0.0,LHT7=2.015,

```

```

MTUB5=31.47,MTUB6=71.89,MTUB7=29.91,MISOT1=37.98,
MISOT2=16.69,MISOT3=36.42,MISOT4=24.31,MISOT5=6.87,
MISOT6=12.89,MISOT7=10.22,
CPAC=460.47,CPACC=473.02,CPSC=1006.88,CPLR=837 60,
FT1=0.99,FT2=0.99,TIN=28 00,TAR=29.00,
LVT1=3.344,LVT2=7.796,LVT3=3.870,LVT4=2.435,LVT5=3.398,
LVT6=5.744,LVT7=5.392,LVT8=3.794,LVT9=0.0,LVT10=2.015,
LVT11=0.0,LVT12=3.150,LVT13=0.0,LVT14=3.861,LVT15=4.0,LVT16=1.0,
LR1=2.464,LR2=2.500,LR3=28.000
AJFT1=0.7854*DP1T1*DP1T1
GAGT1=M3PT/ADF1
ADF2=0.7854*DP1T2*DP2T2
GAGT2=M2PT/ADF2
GAGT3=M3PT/ADF3
ADF3=0.7854*DP1T3*DP1T3
ADF4=0.7854*DP1T4*DP1T4
GAGT4=M2PT/ADF4
ADF5=0.7854*DP1T5*DP1T5
GAGT5=M4PT/ADF5
ADF6=0.7854*DP1T6*DP1T6
GAGT6=M1PT/ADF6
ADF7=0.7854*DP1T7*DP1T7
GAGT7=M8PT/ADF7
ADF8=0.7854*DP1T8*DP1T8
GAGT8=M3PT/ADF8
ADF9=0.7854*DP1T9*DP1T9
GAGT9=M1PT/ADF9
GAG10=M3PT/STETR1
GAG11=M2PT/STETR2
GAG12=M1PT/ASTTR1
GAG13=M5PT/ASTTR2
GAG14=M3PT/STETR3
GAG15=M6PT/ASTTR3
FJUNCTION JCPA=(0.,4.2178E3),(20.,4.181E3),(60.,4.1784E3),...
(60.,4.1843E3),(80.,4.1964E3),(100.,4.2161E3),...
(120.,4.25E3),(140.,4.283E3),(160.,4.342E3),...
(180.,4.417E3),(200.,4.505E3),(220.,4.61E3),...
(240.,4.756E3),(260.,4.949E3),(280.,5.208E3),...
(300.,5.728E3)
FUNCTION TRJA=(0.,1002.29),(20.,1000.52),(40.,1994.59),(60.,995.46),...
(80.,976.08),(100.,960.63),(120.,945.25),(140.,928.27),...
(160.,909.69),(180.,889.03),(200.,866.76),...
(220.,842.41),...
(240.,815.66),(260.,785.87),(280.,752.55),(300.,714.26)
FUNCTION TMIA=(0.0,1.794E-3),(10.,1.31E-3),(37.78,6.821E-4),...
(65.56,4.341E-4),(93.33,3.051E-4),(121.11,2.348E-4),...
(148.89,1.869E-4),(176.67,1.553E-4),(204.44,1.352E-4),...
(232.22,1.186E-4),(260.,1.058E-4),(287.78,9.539E-5)
FJUNCTION TKA=(0.0,0.551),(10.,0.575),(37.78,0.63),(65.56,0.664),...
(93.33,0.691),(121.11,0.685),(148.89,0.684),...
(176.67,0.676),(204.44,0.659),(232.22,0.635),...
(260.,0.605),(287.78,0.562)
FJUNCTION TCPA7=(0.0,4200.41),(10.,4183.23),(37.78,4158.53),...
(65.56,4166.07),(93.33,4130.35),(121.11,4226.78),...
(148.89,4284.14),(176.67,4373.32),(204.44,4496.84),...
(232.22,4664.32),(260.,4923.91),(287.78,5317.49)
FUNCTION TRJAT=(0.0,1003.13),(10.,1002.50),(37.78,996.27),...
(65.56,983.43),(93.33,966.22),(121.11,945.13),...
(148.89,921.75),(176.67,894.47),(204.44,863.15),...
(232.22,828.76),(260.,789.16),(287.78,739.95)
FUNCTION TMIA7=(0.,1.781E-3),(10.,1.304E-3),(37.78,6.833E-4),...
(65.56,4.378E-4),(93.33,3.092E-4),(121.11,2.383E-4),...
(148.89,1.902E-4),(176.67,1.587E-4),(204.44,1.364E-4),...

```

(232.22,1.195E-4),(250.,1.362E-4),(287.78,9.735E-5)
 FUNCTION TKAT=(0.0,0.554),(10.,.578),(37.78,.633),(65.56,.667),...
 (93.33,.685),(121.11,.691),(148.89,.699),...
 (176.67,.691),(204.44,.665),(232.22,.643),...
 (260.,.608),(287.78,.51)
 FUNCTION TBCK47=(0.0,207.026),(10.0,239.370),(37.78,353.813), ...
 (65.56,452.142),(93.33,543.054),(121.11,618.403), ...
 (148.89,690.070),(176.67,750.594),(204.44,800.548), ...
 (232.22,840.394),(260.00,973.774),(287.78,888.830)
 FUNCTION TABKSC=(0.0,5.28E-2),(148.89,7.21E-2),(250.,8.55E-2), ..
 (371.11,10.23E-2)
 FUNCTION TABKLR=(0.0,3.31E-2),(10.,3.37E-2),(50.,3.61E-2), ...
 (100.,3.95E-2),(200.,6.05E-2),(400.,10.25E-2) ...
 FUNCTION TABKAC=(0.0,16.279),(100.,17.326),(200.,17.326), ...
 (300.,19.070),(400.,19.070)
 FUNCTION TBKACC=(0.0,43.26),(100.,43.26),(200.,41.51), ...
 (300.,39.77),(400.,36.28)
 FUNCTION TBCKM1=(0.0,205.915),(10.0,244.999),(37.78,353.617), ...
 (65.56,453.269),(93.33,545.030),(121.11,621.391), ...
 (148.89,693.653),(176.67,753.831),(204.44,800.336), ...
 (232.22,840.740),(260.00,974.896),(287.78,904.792)
 FUNCTION TBCK01=(0.0,23.989),(10.0,25.650),(37.78,29.651), ...
 (65.56,32.595),(93.33,34.752),(121.11,36.258), ...
 (148.89,37.450),(176.67,38.302),(204.44,38.712), ...
 (232.22,38.893),(260.00,39.933),(287.78,33.825)
 FUNCTION TBCK07=(0.0,24.058),(10.0,25.019),(37.78,29.633), ...
 (65.56,32.607),(93.33,34.796),(121.11,35.297), ...
 (148.89,37.482),(176.67,38.336),(204.44,38.835), ...
 (232.22,38.975),(260.00,38.930),(287.78,38.447)
 FUNCTION TBCKST1=(0.0,84.562),(10.0,96.730),(37.78,127.430), ...
 (65.56,153.327),(93.33,175.486),(121.11,192.856), ...
 (148.89,208.530),(176.67,221.019),(204.44,229.937), ...
 (232.22,237.155),(260.00,242.876),(287.78,247.445)
 FUNCTION TBCKST7=(0.0,85.333),(10.0,94.451),(37.78,127.545), ...
 (65.56,153.128),(93.33,175.177),(121.11,192.407), ...
 (148.89,207.951),(176.67,220.539),(204.44,230.283), ...
 (232.22,237.306),(260.00,242.693),(287.78,243.889)
 FUNCTION TABYK4=(0.0,48.0164),(38.0,42.1470),(93.0,34.9962), ...
 (149.0,30.1764),(205.0,25.7099),(260.0,22.6058), ...
 (317.0,19.9630),(372.0,17.8661),(427.0,16.2285), ...
 (483.0,14.5165),(537.0,13.2604),(650.0,11.1568)
 FUNCTION TABU=(0.0,0.0),(3600.0,4.0E5),(7200.0,4.0E5), ...
 (10800.0,8.0E5),(14400.0,8.0E5),(18000.0,1.2E6), ...
 (21600.0,1.2E6),(25200.0,8.0E5),(28800.0,8.0E5), ...
 (32400.0,4.0E5),(36000.0,4.0E5),(39600.0,0.0), ...
 (100000.0,0.0)

FUNCTION TABP=(0.0,0.0),(1.0,1.6E4),(10000.0,1.6E4)

DYNAMIC

NDSORT

60M6A PRINCIPAL

P=AFGEN(TABP,TIME)
 RJAG88=AFGEN(TROA7,T18)
 MAG88=POAG88*VAC88
 CP18=AFGEN(TCPA7,T18)
 KAC33=AFGEN(TABKAC,T2188)
 CC488=2.*KAC88*AP288/DP288*ALOG(DP288/OP188)
 TFAG53=(TP188+T18)/2.
 CK488=AFGEN(TBCKM7,TFAG88)
 MAG83=(0.023*(GAG88**0.8)+CKM88)/(DP188**0.2)
 TFAR88=(TAR+TP288)/2.

YK488=AFGEN(TABYK4,TFAR88)
 HAR88=0.525*((1.951*(TP288-TAR)+YK488/DP288)**0.25)
 T1=((2.*M1PT*CP18+MAG53*AP188)+T8T86*2.*MAG88*AP188+TP183*2.*P1/ ...
 (2.*M1PT*CP18+MAG88*AP188)
 T2188D=(MAG83*AP188*(T18-TP188)-CC488*(TP188-TP288))/(M33*CPAC)
 T2133=INTGRL(28.00,T2188D)
 TP288=(HAR88*AP288+TAR+CC488*TP183)/(HAR88*AP288+CC488)

YK488=AFGEN(T8YK4,TFAR88)
 HAR88=0.525*((ABS(TP288-TAR)*YK488/DP288)**0.25)
 T1=(12.*N1PT*CP18+HAG88*AP188)*T8T88*2.*HAG88*AP188*TP188*2.*P1/
 (2.*N1PT*CP18+HAG88*AP188)
 T2188D=(HAG88*AP188*(T18-TP188)-CCABB*(TP188-TP288))/(M88*CPAC)
 T2133=INTGRL(28.00,T2188D)
 TP288=(HAR88*AP288*TAR+CCABB*TP188)/(HAR88*AP288+CCABB)
 TP188=2.*T2188-TP288

TUBULACAO 1

CPTNT1=AFGEN(TCPA7,TMT1)
 KACT1=AFGEN(TABKAC,T21T1)
 CCAST1=2.*KACT1*AP2T1/(DP2T1/DP1T1)
 KSCST1=AFGEN(TABKSC,T32T1)
 CCIST1=2.*KSCST1*AP3T1/(DP3T1/DP2T1)
 RJAGST1=AFGEN(T8JA7,TMT1)
 MAGST1=ROAGST1*VAGST1
 TFAGST1=(TP1T1+TMT1)/2.
 CKMST1=AFGEN(T8CKM7,TFAGST1)
 HAGST1=(0.023*(GAGST1**0.8)+CKMST1)/(DP1T1**0.2)
 TFARST1=(TAR+TP3T1)/2.
 YK4ST1=AFGEN(T8YK4,TFARST1)
 HARST1=0.525*((ABS(TP3T1-TAR)*YK4ST1/DP3T1)**0.25)
 HARVT1=0.59*((ABS(TP3T1-TAR)*YK4ST1/LVT1)**0.25)
 HART1=(HARST1*(LHT1+HARVT1*LVT1))/(LHT1+LVT1)
 TMT1D=H3PT*(T1-T1T81)/MAGST1-HAGST1*AP1T1*((T1+T1T81)/2.-TP1T1)/
 (CPTNT1+MAGST1)
 TMT1=INTGRL(28.00,TMT1D)
 T1T81=2.*TMT1-T1
 TP1T1=(CCAT1+TP2T1+MAGST1*AP1T1*TMT1)/(MAGST1*AP1T1+CCAT1)
 T21T1=(TP1T1+TP2T1)/2.
 TP2T1=(CCAT1+TP1T1+CCIST1*TP3T1)/(CCIST1+CCAT1)
 T32T1=(TP2T1+TP3T1)/2.
 TP3T1=(HART1*AP3T1+TAR+CCIST1*TP2T1)/(HART1*AP3T1+CCIST1)

SECAD DE TESTE

CP21=AFGEN(TCPA7,T21)
 KACST=AFGEN(TABKAC,T21ST1)
 CCAST=2.*KACST*AP2ST/(DP2ST+ALOG(DP2ST/DP1ST))
 KSCST=AFGEN(TABKSC,T32ST1)
 CCIST=2.*KSCST*AP3ST/(DP3ST+ALOG(DP3ST/DP2ST))
 RJAGST=AFGEN(T8JA7,T21)
 MAGST=ROAGST*VAGST
 TFAGST=(TP1ST+T21)/2.
 CKMST=AFGEN(T8CKM7,TFAGST)
 HAGST=(0.023*(GAGST**0.8)+CKMST)/(DP1ST**0.2)
 TFARST=(TAR+TP3ST)/2.
 YK4ST=AFGEN(T8YK4,TFARST)
 HARST=0.59*((ABS(TP3ST-TAR)*YK4ST/LST)**0.25)
 J=AFGEN(T8Q,TIME)
 JK=0/1000.0
 T2=((2.*H3PT*CP21+HAGST*AP1ST)*T1T81+2.*HAGST*AP1ST*TP1ST*2.*Q)/
 (2.*H3PT*CP21+HAGST*AP1ST)
 T21=(T1T81+T2)/2.
 TP1ST=(HAGST*AP1ST+T21+CCAST*TP2ST)/(HAGST*AP1ST+CCAST)
 T21ST=(TP1ST+TP2ST)/2.
 T32STD=(CCAST*(TP1ST-TP2ST)-CCIST*(TP2ST-TP3ST))/(MISOST*CPSC)
 T32ST=INTSPL(28.00,T32STD)
 TP2ST=2.*T32ST-TP3ST

TP3ST=(HARST*AP3ST*TAR+CCIST*TP2ST)/(HARST*AP3ST+CCIST)

*
*
*
*

TUOLACAO 3

CPHT3=AFGEN(TCPA7,THT3)
KACT3=AFGEN(TABKAC,T2IT3)
CCAT3=2.*KACT3*AP2T3/(DP2T3*ALOG(DP2T3/DP1T3))
KSC3=AFGEN(TABKSC,T32T3)
CCIT3=2.*KSC3*AP3T3/(DP3T3*ALOG(DP3T3/DP2T3))
ROAGT3=AFGEN(TROAT,TMT3)
MAGT3=ROAGT3*VAGT3
TFAGT3=(TP1T3+TMT3)/2.
CKMT3=AFGEN(TCKM7,TFAGT3)
HAST3=(0.923*(GAGT3**0.8)+CKMT3)/(DP1T3**0.2)
TFART3=(TAR+TP3T3)/2.
YK4T3=AFGEN(TABYK4,TFART3)
M44T3=0.525*(ABS(TP3T3-TAR)*YK4T3/DP3T3)**0.25)
HARVT3=0.59*(ABS(TP3T3-TAR)*YK4T3/LVT3)**0.25)
HART3=(HAPHT3*LHT3+HARVT3*LVT3)/(LHT3+LVT3)
T2TB3=((2.*CPHT3*H3PT-HAGT3*AP1T3)*T2+2.*HAGT3*AP1T3*TP1T3)/
 (HAGT3*AP1T3+2.*CPHT3*H3PT)
T4T3=(T2+T2T63)/2.
TP1T3=(CCAT3*TP2T3+MAGT3*AP1T3*TMT3)/(HAGT3*AP1T3+CCAT3)
T2IT3=(TP1T3+TP2T3)/2.
TP2T3=(CCAT3*TP1T3+CCIT3*TP3T3)/(CCAT3+CCIT3)
T32T3=(TP2T3+TP3T3)/2.
TP3T3=(HART3*AP3T3*TAR+CCIT3*TP2T3)/(HART3*AP3T3+CCIT3)

*
*
*
*

RESFRIADOP C-101

CP32=AFGEN(TCPA7,T32)
KACR1=AFGEN(TABKAC,T2R1)
CCAR1=2.*KACR1*AP2R1/(DP2R1*ALOG(DP2R1/DP1R1))
KSCR1=AFGEN(TABKSC,T32R1)
CCR1=2.*KSCR1*AP3R1/(DP3R1*ALOG(DP3R1/DP2R1))
RAG1R1=AFGEN(TROAT,T32)
MAG1R1=RAG1R1*VAG1R1
TFAG1R1=(TP1R1+T32)/2.
CKM1R1=AFGEN(TCKM7,TFAG1R1)
TFARR1=(TAR+TP3R1)/2.
YK4R1=AFGEN(TABYK4,TFARR1)
M44R1=0.525*(ABS(TP3R1-TAR)*YK4R1/DP3R1)**0.25)
TWR1=(T91+T32)/2.
TFWR1=(TWR1+T32)/2.
TFWR2=(TWR1+T91)/2.
M1R1=AFGEN(TMIA7,TWR1)
M1R2=AFGEN(TMIA,TWR1)
KACTR1=AFGEN(TABKAC,TWR1)
CDD1R1=AFGEN(TBCDD7,TFWR1R1)
CST2R1=AFGEN(TBCST1,TFWR2R1)
M1A2R1=C21*(GAG1R1**0.6)*CDD1R1/((DEXTR1**0.4)*(M1R1**0.14))
M1A2R1=0.023*(GAG2R1**0.8)*CST2R1/((DINTR1**0.2)*(M1W2R1**0.14))
HAGR1=MOAIR1
T4L1=T32-T91
UJ1=1./((1./MOAIR1)+(DEXTR1*ALOG(DEXTR1/DINTR1))/(2.*KACTR1))**0.5
 (DEXTR1/(DINTR1*M1A2R1))+3.8E-4)
T320=43PT*(T2TB3-T3)/MAG1R1-A1*UJ1*TML1/(CP32*MAG1R1)-
 M44R1*AP1R1-((T3+T2TB3)/2.-TP1R1)/(CP32*MAG1R1)
T32=INTGRL(28.00,T320)
T3=2.*T32-T2T83
T21R1D=(HAGR1*AP1R1-(T32-TP1R1)-CCAR1*(TP1R1-TP2R1))/(4R1+CPAC1)

T21R1=INTGRL(28.00,T21R1D)
TP1R1=2.*T21R1-TP2R1
T32R1D=(CCAR1*(TP1R1-TP2R1)-CCR1*(TP2R1-TP3R1))/(MISDR1+CPSC)
T32R1=INTGRL(28.00,T32R1D)
TP2R1=2.*T32R1-TP3R1
TP3R1=(HARR1*AP3R1*TAR+CCR1*TP2R1)/(HARR1*AP3R1+CCR1)
CP31=AFGEN(TCPA7,T91)

T21R1=INTGR1(28,00,T21R1D)
 TP11=2.*T21R1-TP2R1
 T32R10=(CCAK1*(TP1R1-TP2R1)-CCIR1*(TP2R1-TP3R1))/(MISOR1*CPSC)
 T32R1=INTGR1(28,00,T32R1D)
 TP2R1=2.*T32R1-TP3R1
 TP3R1=(HARP1*AP3R1-TAR+CCIR1-TP2R1)/(HARR1*AP3R1+CCIR1)
 CP1=AFGEN(TCPA,T91)
 MAG2R1=AFGEN(TRDA,T91)
 MAG2R1=RAG2R1*VAG2R1
 T9=TIN*(AR1*UD1*THL1)/(HRIPT*CP91)
 T91=(TIN+T9)/2.

TUBULACAO 2

C1TMT2=AFGEN(TCPA7,TMT2)
 KACT2=AFGEN(TACKAC,T21T2)
 CCA2=2.*KACT2*AP2T2/(DP2T2*ALOG(DP2T2/DP1T2))
 KSC2=AFGEN(TABKSC,T32T2)
 CCIT2=2.*KSC2*AP3T2/(DP3T2*ALOG(DP3T2/DP2T2))
 R0AGT2=AFGEN(TR0A7,TMT2)
 MAGT2=RDAGT2*VAGT2
 TFAGT2=(TP1T2+TMT2)/2.
 CKMT2=AFGEN(TCKM7,TFAGT2)
 HAGT2=(0.023*(GAGT2**0.8)*CKMT2)/(DP1T2**0.2)
 TFART2=(TAR+TP3T2)/2.
 YK4T2=AFGEN(TAJYK4,TFART2)
 HARVT2=0.525*((ABS(TP3T2-TAR)*YK4T2/DP3T2)**0.25)
 HARVT2=0.59*((ABS(TP3T2-TAR)*YK4T2/LVT2)**0.25)
 HART2=(HARHT2*LHT2+HARVT2*LVT2)/(LHT2+LVT2)
 T1TB2=((2.-CPTMT2*M2PT-HAGT2*AP1T2)*T1+2.*HAGT2*AP1T2*TP1T2)/
 (HAGT2*AP1T2+2.*CPTMT2*M2PT)
 TMT2=(T1+T1TB2)/2.
 TP1T2=(HAGT2*AP1T2*TMT2+CCAT2*TP2T2)/(HAGT2*AP1T2+CCAT2)
 T21T2=(TP1T2+TP2T2)/2.
 TP2T2=(CCAT2*TP1T2+CCIT2*TP3T2)/(CCAT2+CCIT2)
 T32T2=(TP2T2+TP3T2)/2.
 TP3T2=(HART2*AP3T2+TAR+CCIT2*TP2T2)/(HART2*AP3T2+SCIT2)

RESFR:AD0R C-102

CP41=AFGEN(TCPA7,T41)
 MAG1R2=AFGEN(TR0A7,T41)
 MAG1R2=RAG1R2*VAG1R2
 CP101=AFGEN(TCPA,T101)
 KACCR2=AFGEN(TACKAC,T21R2)
 CCA2=2.*KACCR2*AP2R2/(DP2R2*ALOG(DP2R2/DP1R2))
 RAG2R2=AFGEN(TRDA,T101)
 MAG2R2=RAG2R2*VAG2R2
 TFAGR2=(TP1R2+T101)/2.
 CKMR2=AFGEN(TCKM1,TFAGR2)
 TFARR2=(TP2R2+TA4)/2.
 YK4R2=AFGEN(TABYK4,TFARR2)
 HARR2=0.525*((ABS(TP2R2-TAR)*YK4R2/DP2R2)**0.25)
 HAR2=(T41+T101)/2.
 TFWR2=(TFWR2+T101)/2.
 TFWR2=(TFWR2+T41)/2.
 MI1R2=AFGEN(TMIA7,TWR2)
 MI2R2=AFGEN(TMIA,TWR2)
 KACTR2=AFGEN(TACKAC,TWR2)
 CDD2R2=AFGEN(TDCDD1,TFWR2)
 CST1R2=AFGEN(TDCST7,TFWR2)

HJA2R2=C92*(GAG2R2**0.6)*CDD2R2/((DEXTR2**0.4)*(MIW2R2**0.14))
 HIA1R2=0.023*(GAG1R2**0.8)*CST1R2/((DINTR2**0.2)*(MIW1R2**0.14))
 HAG2=HQA2P2
 TML2=T41-T101
 UJ2=1./((1./HQA2R2)+(DEXTR2*ALOG(DEXTR2/DINTR2)/(2.*KACTR2)))+...
 (DEXTR2/DINTR2*HIA1R2))+3.8E-4)
 T41D=45PT*(T1T82-T4)/MAG1R2-AR2-UO2*TML2/(CP41*HAG1R2)
 T41=INTGRL(28.00,T41D)
 T4=2.*T41-T1T52
 T101D=MR2PT*(T1IN-T101)/HAG2R2+AR2*UO2*TML2/(CP101*HAG2R2)-
 HAG2*AP1R2*((T10+T1IN)/2.-TP1R2)/(CP101)=HAG2R2)
 T101=INTGRL(28.00,T101D)
 T10=2.*T101-T1IN
 T21R2D=(HAG2*AP1R2*(T101-TP1R2)-CCACR2*(TP1R2-TP2R2))/(MR2*CPACC)
 T21R2=INTGRL(28.00,T21R2D)
 TP2R2=(HARR2*AP2R2*TAR+CCACR2*TP1R2)/(HARR2*AP2R2+CCACR2)
 TP1R2=2.*T21R2-TP2R2

RESFRIADOR C-103

GP54=AFGENITCPA7,T541
 RAG1R3=AFGENITROA7,T541
 MAG1R3=RAG1R3*VAG1R3
 CP111=AFGENITCPA,T111)
 KACCR3=AFGENITBKACC,T21R3)
 CCACR3=2.*KACCR3*AP2R3/(DP2R3*ALOG(DP2R3/CP1R3))
 RAG2R3=AFGENITROA,T111)
 MAG2R3=RAG2R3*VAG2R3
 TFAG3=(TP1R3+T111)/2.
 CKM3=AFGENITBCKM1,TFAGR3)
 TFA4R3=(TP2R3+TAR)/2.
 YK4R3=AFGENITABYK4,TFARR3)
 HARR3=0.525*((48SI*TP2R3-TAR)*YK4R3/DP2R3)**0.25)
 TWR3=(T111+T54)/2.
 TFW2R3=(TWR3+T111)/2.
 TWR3=(TWR3+T54)/2.
 MI1R3=AFGENITMIA7,TWR3)
 MI2R3=AFGENITMIA,TWR3)
 KACTR3=AFGENITABKAC,TWR3)
 CST2R3=AFGENITBCST1,TFWR3)
 CST1R3=AFGENITBCST7,TFWR3)
 HJA2R3=0.023*(GAG2R3**0.6)*CST2R3/((DEQ2R3**0.2)*(MIW2R3**0.14))
 HIA1R3=0.023*(GAG1R3**0.8)*CST1R3/((DINTR3**0.2)*(MIW1R3**0.14))
 HAG3=HQA3P2
 TML3=T54-T111
 UJ3=1./((1./HQA3R3)+(DEXTR3*ALOG(DEXTR3/DINTR3)/(2.*KACTR3)))+...
 (DEXTR3/DINTR3*HIA1R3))+3.8E-4)
 T54D=46PT*(T4-T5)/MAG1R3-AR3-UO3*TML3/(CP54*HAG1R3)
 T54=INTGRL(28.00,T54D)
 T5=2.*T54-T4
 T11=(12.*CP111*MR3PT-HAG3*AP1R3)*TIN+2.*AR3*UO3*TML3+
 2.*HAG3*AP1R3*TP1R3)/(2.*CP111*MR3PT+HAG3*AP1R3)
 T111=(TIN+T11)/2.
 TP1R3=(HAG3*AP1R3*T111+CCACR3*TP2R3)/(CCACR3+HAG3*AP1R3)
 T21R3=(TP1R3+TP2R3)/2.
 TP2R3=(HARR3*AP2R3*TAR+CCACR3*TP1R3)/(HARR3*AP2R3+CCACR3)

TUBULACAO 7

CPT4T7=AFGENITCPA7,TMT7)
 KACT7=AFGENITABKAC,T21T7)
 CCAT7=2.*KACT7*AP2T7/(DP2T7*ALOG(DP2T7/DP1T7))
 KACT7=AFGENITABKAC,T32T7)
 CCT7=2.*KACT7*AP3T7/(DP3T7*ALOG(DP3T7/DP2T7))
 RJA5T7=AFGENITROA7,TMT7)
 MAGT7=ROAGT7*VAGT7
 TFAGT7=(TP1T7+TMT7)/2.
 CKMT7=AFGENITBCKM7,TFAGT7)
 HACT7=(G.023*(GAGT7**0.6)*CKMT7)/(DP1T7**0.2)

CCAT7=2.*KACT7*AP2T7/(DP2T7*ALOG(DP2T7/DP1T7))
 KACT7=AFGEN(TABKSC,T32T7)
 CCIT7=2.*KACT7*AP3T7/(DP3T7*ALOG(DP3T7/DP2T7))
 RJAGT7=AFGLN(TROA7,TMT7)
 HAGT7=ROAGT7*VAGT7
 TFACT7=(TP1T7+TMT7)/2.
 CKMT7=AFGEN(TBCKM7,TFACT7)
 HAST7=(0.023*(GAGT7**0.8)*CKMT7)/(DP1T7**0.2)
 TFART7=(TAK+TP3T7)/2.
 YK4T7=AFGEN(TABYK4,TFART7)
 HARHT7=0.525*(ABS(TP3T7-TAR)*YK4T7/DP3T7)**0.25)
 HART7=HARHT7
 T1TB7=((2.*CPTMT7*M3PT-HAGT7*AP1T7)*T1TB2+2.*HAGT7*AP1T7+T1TB7)/
 ((HAGT7*AP1T7+2.*CPTMT7*M3PT)
 TMT7=(T1TB2+T1TB7)/2.
 TP1T7=(CCAT7*TP2T7+HAGT7*AP1T7+TMT7)/(HAGT7*AP1T7+CCAT7)
 T2T7=(TP1T7+TP2T7)/2.
 TP2T7=(CCAT7*TP1T7+CCIT7*TP3T7)/(CCAT7+CCIT7)
 T3T7=(TP2T7+TP3T7)/2.
 TP3T7=(HART7*AP3T7+TAR+CCIT7*TP2T7)/(HART7*AP3T7+CCIT7)

*
 *
 * BALANCA A
 *
 *
 * C31TB7=AFGEN(TCPA7,T1TB7)
 * CP4=AFGEN(TCPA7,T4)
 * CP6=AFGEN(TCPA7,T6)
 * T6=(M3PT*C31TB7+T1TB7+M3PT*CP4+T4)/(M3PT*CP6)

*
 *
 * TUBULACAO 4
 *
 *
 * CPTMT4=AFGEN(TCPA7,TMT4)
 * KACT4=AFGEN(TABKAC,T21T4)
 * CCAT4=2.*KACT4*AP2T4/(DP2T4*ALOG(DP2T4/DP1T4))
 * KACT4=AFGEN(TABKSC,T32T4)
 * CCIT4=2.*KACT4*AP3T4/(DP3T4*ALOG(DP3T4/DP2T4))
 * RJAGT4=AFGEN(TROA7,TMT4)
 * HAGT4=ROAGT4*VAGT4
 * TFACT4=(TP1T4+TMT4)/2.
 * CKMT4=AFGEN(TBCKM7,TFACT4)
 * HAST4=(0.023*(GAGT4**0.8)*CKMT4)/(DP1T4**0.2)
 * TFART4=(TAK+TP3T4)/2.
 * YK4T4=AFGEN(TABYK4,TFART4)
 * HARHT4=0.525*(ABS(TP3T4-TAR)*YK4T4/DP3T4)**0.25)
 * HARVT4=0.59*(ABS(TP3T4-TAR)*YK4T4/LVT4)**0.25)
 * HART4=(HARHT4+LHT4+HARVT4*LVT4)/(LHT4+LVT4)
 * T3TB4=((2.*CPTMT4*M3PT-HAGT4*AP1T4)*T3+2.*HAGT4*AP1T4+T3TB4)/
 ((HAGT4*AP1T4+2.*CPTMT4*M3PT)
 TMT4=(T3+T3TB4)/2.
 TP1T4=(CCAT4*TP2T4+HAGT4*AP1T4+TMT4)/(HAGT4*AP1T4+CCAT4)
 T2T4=(TP1T4+TP2T4)/2.
 TP2T4=(CCAT4*TP1T4+CCIT4*TP3T4)/(CCAT4+CCIT4)
 T3T4=(TP2T4+TP3T4)/2.
 TP3T4=(HART4*AP3T4+TAR+CCIT4*TP2T4)/(HART4*AP3T4+CCIT4)

*
 *
 * BALANCA B
 *
 *
 * CP3TB4=AFGEN(TCPA7,T3TB4)
 * CP7=AFGEN(TCPA7,T7)
 * T7=(M3PT*CP3TB4+T3TB4+M3PT*CP6+T6)/(M3PT*CP7)

```

*
*      TUBULACAO 5
*
CPTMT5=AFGEN(TCPA7,TMT5)
KACT5=AFGEN(TAKAC,T21T5)
CCAT5=2.*KACT5*AP2T5/(DP2T5*ALOG(DP2T5/DP1T5))
KSCCT5=AFGEN(TABKSC,T32T5)
CCIT5=2.*KSCCT5*AP3T5/(DP3T5*ALOG(DP3T5/DP2T5))
RJAGT5=AFGEN(TROAT,TMT5)
MAGT5=RJAGT5*VAGT5
TFAGT5=(TP1T5+TMT5)/2.
CKMT5=AFGEN(TBCKM7,TFAGT5)
MAGT5=(0.023*(GAGT5**0.8)*CKMT5)/(DP1T5**0.2)
TFART5=(TAR+TP3T5)/2.
YK4T5=AFGEN(TABYK4,TFART5)
HART5=0.525*(ABS(TP3T5-TAR)*YK4T5/DP3T5)**0.25)
HART5=HART5
T7T85=((2.*CPTMT5*M4PT-HAGT5*AP1T5)*T7+2.*HAGT5*AP1T5*TP1T5)/
      (HAGT5*AP1T5+2.*CPTMT5*M4PT)
TMT5=(T7+T7T85)/2.
TP1T5=(CCAT5*TP2T5+HAGT5*AP1T5*TMT5)/(HAGT5*AP1T5+CCAT5)
T21T5=(TP1T5+TP2T5)/2.
TP2T5=(CCAT5*TP1T5+CCIT5*TP3T5)/(CCAT5+CCIT5)
T32T5=(TP2T5+TP3T5)/2.
TP3T5=(HART5*AP3T5+TAR+CCIT5*TP2T5)/(HART5*AP3T5+CCIT5)

```

```

*
*      BALANCA C
*
CP7T85=AFGEN(TCPA7,T7T85)
CP5=AFGEN(TCPA7,T5)
CP8=AFGEN(TCPA7,T8)
TB=(M4PT*CP7T85+T7T85+M6PT*CP5*T5)/(M1PT*CP8)

```

```

*
*      TUBULACAO 6
*
CPTMT6=AFGEN(TCPA7,TMT6)
KACT6=AFGEN(TABKAC,T21T6)
CCAT6=2.*KACT6*AP2T6/(DP2T6*ALOG(DP2T6/DP1T6))
KSCCT6=AFGEN(TABKSC,T32T6)
CCIT6=2.*KSCCT6*AP3T6/(DP3T6*ALOG(DP3T6/DP2T6))
RJAGT6=AFGEN(TROAT,TMT6)
MAGT6=RJAGT6*VAGT6
TFAGT6=(TP1T6+TMT6)/2.
CKMT6=AFGEN(TBCKM7,TFAGT6)
MAGT6=(0.023*(GAGT6**0.8)*CKMT6)/(DP1T6**0.2)
TFART6=(TAR+TP3T6)/2.
YK4T6=AFGEN(TABYK4,TFART6)
HART6=0.525*(ABS(TP3T6-TAR)*YK4T6/DP3T6)**0.25)
HART6=HART6
T8T95=((2.*CPTMT6*M1PT-HAGT6*AP1T6)*T8+2.*HAGT6*AP1T6*TP1T6)/
      (HAGT6*AP1T6+2.*CPTMT6*M1PT)
TMT6=(T8+T8T95)/2.
TP1T6=(CCAT6*TP2T6+HAGT6*AP1T6*TMT6)/(HAGT6*AP1T6+CCAT6)
T21T6=(TP1T6+TP2T6)/2.
TP2T6=(CCAT6*TP1T6+CCIT6*TP3T6)/(CCAT6+CCIT6)
T32T6=(TP2T6+TP3T6)/2.
TP3T6=(HART6*AP3T6+TAR+CCIT6*TP2T6)/(HART6*AP3T6+CCIT6)
T18=(T1+T8T36)/2.
PRTPL0T T218(T18,TP18,TP28)
PRTPL0T T21ST(T21,TP1ST,TP2ST),T32ST(TP2ST,T32ST,TP3ST)
PRTPL0T T21R1(T32,TP1R1,TP2R1),T32R1(TP2R1,T32R1,TP3R1)

```

```

PRTPL0T TMT1(T1,T1T8),T21T1(TMT1,TP1T1,TP2T1),T32T1(TP2T1,T32T1,TP3T1)
PRTPL0T TMT2(T2,T2T8),T21T2(TMT2,TP1T2,TP2T2),T32T2(TP2T2,T32T2,TP3T2)
PRTPL0T TMT3(T3,T3T8),T21T3(TMT3,TP1T3,TP2T3),T32T3(TP2T3,T32T3,TP3T3)
PRTPL0T TMT4(T4,T4T8),T21T4(TMT4,TP1T4,TP2T4),T32T4(TP2T4,T32T4,TP3T4)
PRTPL0T TMT5(T5,T5T8),T21T5(TMT5,TP1T5,TP2T5),T32T5(TP2T5,T32T5,TP3T5)
TITLE LOPP DE AGUA - OPERACAO PWR
CALL DEBUC (1,0,0)
CALL DEBUC (5,740,0)

```

```

PRTPLOT TMT1(T),T1(T),T2(T)(TMT1,TP1(T),TP2(T)),T3(T)(TP2(T),T3(T),TP3(T))
PRTPLOT TMT2(T1,T1(T2),T2(T)(TMT2,TP1(T),TP2(T)),T3(T)(TP2(T),T3(T),TP3(T))
PRTPLOT TMT3(T2,T2(T3),T2(T)(TMT3,TP1(T),TP2(T)),T3(T)(TP2(T),T3(T),TP3(T))
PRTPLOT TMT4(T3,T3(T4),T2(T)(TMT4,TP1(T),TP2(T)),T3(T)(TP2(T),T3(T),TP3(T))
PRTPLOT TMT5(T7,T7(T5),T2(T)(TMT5,TP1(T),TP2(T)),T3(T)(TP2(T),T3(T),TP3(T))
TITLE LOOP DE AGUA - OPERACAO PWR
CALL DEBUG (1,0.0)
CALL DEBUG (5,749.0)
CALL DEBUG (1,5400.0)
CALL DEBUG (1,8000.0)
METHOD RECT
TIMER FINTIM=43200.0,OUTDEL=900.0,PRDEL=900.0,DELT=4.0
END
STOP

```

OUTPUT VARIABLE SEQUENCE

ADFT1	GAGT1	ADFT2	GAGT2	ADFT3	GAGT3	ADFT4	GAGT4	ADFT5	GAGT5
ADFT6	GAGT6	ADFT7	GAGT7	ADFT8	GAGT8	ADFT9	GAGT9	ADFT10	GAGT10
GAG2R1	GAG1R2	GAG2R3	GAG1R3	P	ROAG8B	MAG8B	CP18	KAC8B	CC8B
TFAG3B	CK4B	MAG3B	TFAR3B	YK4B	HAR3B	T1	T218B	T21B	TP2B
TP1B	CPTMT1	KACT1	CCAT1	KSCT1	CCIT1	ROAGT1	MAGT1	TFAGT1	CKMT1
MAGT1	TFART1	YK4T1	HARHT1	HARVT1	HART1	TMT1D	TMT1	T1T1	TP1T1
T21T1	TP2T1	T32T1	TP3T1	CP21	KACST	CCAST	KSCST	CCIST	RJAGST
MAGST	TFAGST	CKMST	MAGST	TFARST	YK4ST	HARST	Q	QKW	T2
T21	TP1ST	T21ST	T32ST	T32ST	TP2ST	TP3ST	CPTMT3	KACT3	CCAT3
KSCT3	CCIT3	ROAGT3	MAGT3	TFAGT3	CKMT3	MAGT3	TFART3	YK4T3	HARHT3
HARVT3	HART3	T2T3	TMT3	TP1T3	T21T3	TP2T3	T32T3	TP3T3	CP32
KACR1	CCAR1	CCAR1	CCJR1	RAG1R1	MAG1R1	TFAGR1	CKMR1	TFARR1	YK4R1
HAR1	TFAR1	TFWR1	MIW1R1	MIW2R1	KACTR1	CCDR1	CST2R1	HOA1R1	MIW1R1
MIW2R1	MAGR1	TML1	UJ1	T32D	T32	T3	T21R1D	T21R1	TP1R1
T32R1D	T32R1	TP2R1	TP3R1	CP91	RAG2R1	MAG2R1	T9	T91	CPTMT2
KACT2	CCAT2	KSCT2	CCIT2	ROAST2	MAGT2	TFAGT2	CKMT2	MAGT2	TFART2
YK4T2	HARHT2	HARVT2	HART2	T1T2	TMT2	TP1T2	T21T2	TP2T2	T32T2
TP3T2	CP41	RAG1R2	MAG1R2	CP101	KACCR2	CCACR2	RAG2R2	MAG2R2	TFAGR2
CKMR2	TFARR2	YK4R2	HARR2	THR2	TFWR2	TFWR2	MIW1R2	MIW2R2	KACTR2
CDJ2R2	CST1R2	HOA2R2	HTA1R2	HAGR2	TML2	UJ2	T410	T41	T4
T1J1D	T1J1	T10	T21R2D	T21R2	TP2R2	TP1R2	CP54	RAG1R3	MAG1R3
CP111	KACCR3	CCACR3	FAG2R3	MAG2R3	TFAGR3	CKMR3	TFARR3	YK4R3	HARR3
THR3	TFWR3	TFWR3	MIW1R3	MIW2R3	KACTR3	CST2R3	CST1R3	HOA2R3	HTA1R3
MAGR3	THL3	UJ3	T540	T54	T5	T11	T11	TP1R3	T21R3
TP2R3	CPTMT7	KACT7	CCAT7	KSCT7	CCIT7	ROAGT7	MAGT7	TFAGT7	CKMT7
MAGT7	TFART7	YK4T7	HARHT7	HARVT7	HART7	T1T7	TMT7	TP1T7	T21T7
TP2T7	TP3T7	CP1T7	CP4	CP6	T6	CPTMT4	KACT4	CCAT4	KSCT4
CCIT4	ROAST4	MAGT4	TFAGT4	CKMT4	MAGT4	TFART4	YK4T4	HARHT4	HARVT4
HART4	T3T4	TMT4	TP1T4	T21T4	TP2T4	T32T4	TP3T4	CP3T4	CP7
T7	CPTMT5	KACT5	CCAT5	KSCT5	CCIT5	ROAGT5	MAGT5	TFAGT5	CKMT5
MAGT5	TFART5	YK4T5	HARHT5	HARVT5	T7T5	TMT5	TP1T5	T21T5	TP2T5
T3T5	TP3T5	CP7T5	CP5	CP8	T8	CPTMT6	KACT6	CCAT6	KSCT6
CCIT6	ROAST6	MAGT6	TFAGT6	CKMT6	MAGT6	TFART6	YK4T6	HARHT6	HART6
T3T6	TMT6	TP1T6	T21T6	TP2T6	T32T6	TP3T6	T18	Z20021	

OUTPUTS INPUTS PARAMS INTEGERS + MEM BLKS FORTRAN DATA CDS
343(500) 999(1400) 263(400) 10+ 0= 10(300) 358(600) 156

ENDJOB

APÊNDICE III

GRÁFICOS E RESULTADOS

Neste apêndice apresenta-se alguns gráficos de temperaturas em função do tempo de simulação.

Condições de operação do CEA referentes as figuras III-1 e III-2.

- Método de integração - Runge-Kutta com passo de integração variável.
- Tempo de simulação - 1500 segundos
- Potência da Seção de Teste variando com o tempo (Figura 3.1)
- Modelo com 36 equações diferenciais.

Condições de operação do CEA referentes as figuras III-3 e III-4

- Método de integração - Euler com passo de integração de 4 segundos
- Tempo de simulação - 8100 segundos.
- Potência da Seção de Teste variando com o tempo (Figura 3.2)
- Modelo com 10 equações diferenciais.

Nomenclatura para as figuras do Apêndice III

- Time = tempo de simulação (s)
- T_2 = temperatura da água de processo ao sair da Seção de Teste ($^{\circ}\text{C}$).
- T_{1B1} = temperatura da água de processo ao entrar na Seção de Teste ($^{\circ}\text{C}$).
- T_{21} = temperatura média da água de processo no interior da Seção de Teste ($^{\circ}\text{C}$).

- T2TB3 = temperatura da água de processo ao entrar no resfriador C-101 ($^{\circ}\text{C}$).
- T3 = temperatura da água de processo ao sair do resfriador C-101 ($^{\circ}\text{C}$).
- T32 = temperatura média da água de processo no interior do resfriador C-101 ($^{\circ}\text{C}$).
- T3TB4 = temperatura da água de processo ao sair da tubulação TUB-4 ($^{\circ}\text{C}$).
- T9 = temperatura da água de resfriamento ao sair do resfriador C-101 ($^{\circ}\text{C}$).
- TIN = temperatura da água de resfriamento ao entrar no resfriador C-101 ($^{\circ}\text{C}$).
- T9I = temperatura média da água de resfriamento no interior do resfriador C-101 ($^{\circ}\text{C}$).
- TMT1 = temperatura média da água de processo no interior da tubulação TUB-1 ($^{\circ}\text{C}$).
- T1 = temperatura da água de processo ao entrar na tubulação TUB-1 ($^{\circ}\text{C}$).
- T1TB1 = temperatura da água de processo ao sair da tubulação TUB-1 ($^{\circ}\text{C}$).

PAGE 1
 MINIMUM 2.750E 01
 MAXIMUM 6.1770E 01

TIME	T2	MINIMUM	T2	VERSUS TIME	T2	MAXIMUM	T2T3
0.0		2.750E 01					
3.000E 01	2.800E 01					2.800E 01	2.800E 01
6.000E 01	2.833E 01					2.8618E 01	2.8370E 01
9.000E 01	2.9266E 01					2.9038E 01	2.9049E 01
1.200E 02	2.9559E 01					2.8941E 01	2.9434E 01
1.500E 02	3.0085E 01					2.9205E 01	2.9895E 01
1.800E 02	3.0574E 01					2.9645E 01	3.0404E 01
2.100E 02	3.1072E 01					3.0000E 01	3.0897E 01
2.400E 02	3.1595E 01					3.0761E 01	3.1409E 01
2.700E 02	3.2126E 01					3.1164E 01	3.1938E 01
3.000E 02	3.2672E 01					3.1580E 01	3.2482E 01
3.300E 02	3.3234E 01					3.2011E 01	3.3036E 01
3.600E 02	3.3809E 01					3.1104E 01	3.3607E 01
3.900E 02	3.4394E 01					3.1431E 01	3.4191E 01
4.200E 02	3.4977E 01					3.1767E 01	3.4782E 01
4.500E 02	3.5604E 01					3.2120E 01	3.5394E 01
4.800E 02	3.6230E 01					3.2478E 01	3.6076E 01
5.100E 02	3.6864E 01					3.2848E 01	3.6638E 01
5.400E 02	3.7506E 01					3.3231E 01	3.7275E 01
5.700E 02	3.8161E 01					3.3621E 01	3.7928E 01
6.000E 02	3.8823E 01					3.4021E 01	3.8587E 01
6.300E 02	3.9492E 01					3.4432E 01	3.9258E 01
6.600E 02	4.0174E 01					3.4843E 01	3.9933E 01
6.900E 02	4.0860E 01					3.5266E 01	4.0612E 01
7.200E 02	4.1550E 01					3.5694E 01	4.1302E 01
7.500E 02	4.2251E 01					3.6129E 01	4.2000E 01
7.800E 02	4.2956E 01					3.6572E 01	4.2704E 01
8.100E 02	4.3665E 01					3.7023E 01	4.3416E 01
8.400E 02	4.4386E 01					3.7471E 01	4.4129E 01
8.700E 02	4.5108E 01					3.7934E 01	4.4850E 01
9.000E 02	4.5840E 01					3.8398E 01	4.5578E 01
9.300E 02	4.6574E 01					3.8866E 01	4.6311E 01
9.600E 02	4.7304E 01					3.9340E 01	4.7044E 01
9.900E 02	4.8050E 01					3.9810E 01	4.7784E 01
1.020E 03	4.8788E 01					4.0292E 01	4.8524E 01
1.050E 03	4.9535E 01					4.0774E 01	4.9275E 01
1.080E 03	5.0289E 01					4.1255E 01	5.0021E 01
1.110E 03	5.1037E 01					4.1748E 01	5.0774E 01
1.140E 03	5.1796E 01					4.2230E 01	5.1525E 01
1.170E 03	5.2549E 01					4.2724E 01	5.2278E 01
1.200E 03	5.3308E 01					4.3217E 01	5.3030E 01
1.230E 03	5.4066E 01					4.3716E 01	5.3793E 01
1.260E 03	5.4834E 01					4.4211E 01	5.4561E 01
1.290E 03	5.5598E 01					4.4714E 01	5.5329E 01
1.320E 03	5.6368E 01					4.5212E 01	5.6094E 01
1.350E 03	5.7138E 01					4.5715E 01	5.6861E 01
1.380E 03	5.7906E 01					4.6220E 01	5.7632E 01
1.410E 03	5.8678E 01					4.6724E 01	5.8402E 01
1.440E 03	5.9450E 01					4.7232E 01	5.9174E 01
1.470E 03	6.0219E 01					4.7743E 01	5.9950E 01
1.500E 03	6.0997E 01					4.8244E 01	6.0721E 01
	6.1770E 01					4.8754E 01	6.1493E 01

Figure III - 1

MINIMUM
2.7607E 01
MAXIMUM
5.1274E 01

PAGE 1

T3 VERSUS TIME

TIME	T3	T2B3	T32	T3TB4
0.0	2.8000E 01	2.8000E 01	2.8000E 01	2.8000E 01
3.0000E 01	2.7747E 01	2.8370E 01	2.8059E 01	2.7745E 01
6.0000E 01	2.7985E 01	2.9049E 01	2.8517E 01	2.7906E 01
9.0000E 01	2.8368E 01	2.9434E 01	2.8901E 01	2.8257E 01
1.2000E 02	2.8605E 01	2.9895E 01	2.9250E 01	2.8529E 01
1.5000E 02	2.8892E 01	3.0404E 01	2.9640E 01	2.8797E 01
1.8000E 02	2.9210E 01	3.0897E 01	3.0053E 01	2.9115E 01
2.1000E 02	2.9533E 01	3.1409E 01	3.0471E 01	2.9431E 01
2.4000E 02	2.9873E 01	3.1938E 01	3.0906E 01	2.9766E 01
2.7000E 02	3.0228E 01	3.2482E 01	3.1355E 01	3.0119E 01
3.0000E 02	3.0599E 01	3.3036E 01	3.1818E 01	3.0484E 01
3.3000E 02	3.0981E 01	3.3607E 01	3.2294E 01	3.0864E 01
3.6000E 02	3.1376E 01	3.4191E 01	3.2784E 01	3.1257E 01
3.9000E 02	3.1788E 01	3.4782E 01	3.3285E 01	3.1658E 01
4.2000E 02	3.2203E 01	3.5394E 01	3.3798E 01	3.2078E 01
4.5000E 02	3.2638E 01	3.6006E 01	3.4322E 01	3.2500E 01
4.8000E 02	3.3078E 01	3.6638E 01	3.4858E 01	3.2937E 01
5.1000E 02	3.3529E 01	3.7275E 01	3.5402E 01	3.3385E 01
5.4000E 02	3.3988E 01	3.7928E 01	3.5958E 01	3.3842E 01
5.7000E 02	3.4457E 01	3.8587E 01	3.6522E 01	3.4308E 01
6.0000E 02	3.4931E 01	3.9258E 01	3.7094E 01	3.4785E 01
6.3000E 02	3.5410E 01	3.9933E 01	3.7675E 01	3.5264E 01
6.6000E 02	3.5910E 01	4.0612E 01	3.8261E 01	3.5752E 01
6.9000E 02	3.6405E 01	4.1302E 01	3.8854E 01	3.6247E 01
7.2000E 02	3.6910E 01	4.2000E 01	3.9455E 01	3.6747E 01
7.5000E 02	3.7419E 01	4.2704E 01	4.0062E 01	3.7257E 01
7.8000E 02	3.7932E 01	4.3416E 01	4.0674E 01	3.7772E 01
8.1000E 02	3.8455E 01	4.4129E 01	4.1292E 01	3.8289E 01
8.4000E 02	3.8980E 01	4.4850E 01	4.1915E 01	3.8813E 01
8.7000E 02	3.9512E 01	4.5578E 01	4.2545E 01	3.9340E 01
9.0000E 02	4.0047E 01	4.6311E 01	4.3179E 01	3.9877E 01
9.3000E 02	4.0584E 01	4.7044E 01	4.3814E 01	4.0415E 01
9.6000E 02	4.1128E 01	4.7784E 01	4.4456E 01	4.0955E 01
9.9000E 02	4.1678E 01	4.8524E 01	4.5098E 01	4.1500E 01
1.0200E 03	4.2217E 01	4.9275E 01	4.5746E 01	4.2051E 01
1.0500E 03	4.2773E 01	5.0020E 01	4.6397E 01	4.2598E 01
1.0800E 03	4.3324E 01	5.0774E 01	4.7049E 01	4.3153E 01
1.1100E 03	4.3885E 01	5.1525E 01	4.7705E 01	4.3707E 01
1.1400E 03	4.4445E 01	5.2278E 01	4.8362E 01	4.4266E 01
1.1700E 03	4.5004E 01	5.3036E 01	4.9020E 01	4.4822E 01
1.2000E 03	4.5562E 01	5.3803E 01	4.9683E 01	4.5393E 01
1.2300E 03	4.6134E 01	5.4561E 01	5.0347E 01	4.5953E 01
1.2600E 03	4.6698E 01	5.5329E 01	5.1013E 01	4.6522E 01
1.2900E 03	4.7268E 01	5.6094E 01	5.1681E 01	4.7083E 01
1.3200E 03	4.7840E 01	5.6861E 01	5.2350E 01	4.7655E 01
1.3500E 03	4.8403E 01	5.7632E 01	5.3020E 01	4.8225E 01
1.3800E 03	4.8980E 01	5.8402E 01	5.3691E 01	4.8798E 01
1.4100E 03	4.9552E 01	5.9174E 01	5.4363E 01	4.9369E 01
1.4400E 03	5.0122E 01	5.9950E 01	5.5036E 01	4.9946E 01
1.4700E 03	5.0692E 01	6.0721E 01	5.5710E 01	5.0516E 01
1.5000E 03	5.1274E 01	6.1490E 01	5.6382E 01	5.1086E 01

Figura III - 2

MINIMUM
2, 8029E 01

T9 VERSUS TIME

MAXIMUM
4, 8820E 01

TIME	T9	MINIMUM	T9	VERSUS TIME	MAXIMUM	T9
0.0	2, 8029E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		2, 8015E 01	2, 8029E 01
1, 8000E 02	2, 9728E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		2, 8864E 01	2, 9728E 01
3, 6000E 02	2, 9527E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		2, 8763E 01	2, 9527E 01
5, 4000E 02	2, 9762E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		2, 8881E 01	2, 9762E 01
7, 2000E 02	3, 0150E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		2, 9075E 01	3, 0150E 01
9, 0000E 02	3, 0643E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		2, 9322E 01	3, 0643E 01
1, 0800E 03	3, 1207E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		2, 9604E 01	3, 1207E 01
1, 2600E 03	3, 1819E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		2, 9910E 01	3, 1819E 01
1, 4400E 03	3, 2462E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 0231E 01	3, 2462E 01
1, 6200E 03	3, 3126E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 0563E 01	3, 3126E 01
1, 8000E 03	3, 3804E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 0902E 01	3, 3804E 01
1, 9800E 03	3, 4261E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 1130E 01	3, 4261E 01
2, 1600E 03	3, 4522E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 1261E 01	3, 4522E 01
2, 3400E 03	3, 4681E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 1341E 01	3, 4681E 01
2, 5200E 03	3, 4778E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 1389E 01	3, 4778E 01
2, 7000E 03	3, 4836E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 1418E 01	3, 4836E 01
2, 8800E 03	3, 5095E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 1548E 01	3, 5095E 01
3, 0600E 03	3, 5537E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 1769E 01	3, 5537E 01
3, 2400E 03	3, 6076E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 2038E 01	3, 6076E 01
3, 4200E 03	3, 6677E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 2339E 01	3, 6677E 01
3, 6000E 03	3, 7313E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 2657E 01	3, 7313E 01
3, 7800E 03	3, 7972E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 2986E 01	3, 7972E 01
3, 9600E 03	3, 8654E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 3327E 01	3, 8654E 01
4, 1400E 03	3, 9346E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 3673E 01	3, 9346E 01
4, 3200E 03	4, 0030E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 4015E 01	4, 0030E 01
4, 5000E 03	4, 0710E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 4355E 01	4, 0710E 01
4, 6800E 03	4, 1161E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 4581E 01	4, 1161E 01
4, 8600E 03	4, 1420E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 4710E 01	4, 1420E 01
5, 0400E 03	4, 1576E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 4788E 01	4, 1576E 01
5, 2200E 03	4, 1670E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 4835E 01	4, 1670E 01
5, 4000E 03	4, 1727E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 4863E 01	4, 1727E 01
5, 5800E 03	4, 1995E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 4998E 01	4, 1995E 01
5, 7600E 03	4, 2460E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 5230E 01	4, 2460E 01
5, 9400E 03	4, 3025E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 5512E 01	4, 3025E 01
6, 1200E 03	4, 3637E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 5819E 01	4, 3637E 01
6, 3000E 03	4, 4278E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 6139E 01	4, 4278E 01
6, 4800E 03	4, 4949E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 6474E 01	4, 4949E 01
6, 6600E 03	4, 5645E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 6823E 01	4, 5645E 01
6, 8400E 03	4, 6347E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 7174E 01	4, 6347E 01
7, 0200E 03	4, 7040E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 7520E 01	4, 7040E 01
7, 2000E 03	4, 7742E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 7871E 01	4, 7742E 01
7, 3800E 03	4, 8238E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 8119E 01	4, 8238E 01
7, 5600E 03	4, 8514E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 8257E 01	4, 8514E 01
7, 7400E 03	4, 8674E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 8337E 01	4, 8674E 01
7, 9200E 03	4, 8766E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 8383E 01	4, 8766E 01
8, 1000E 03	4, 8820E 01	2, 8029E 01	2, 8000E 01		3, 8410E 01	4, 8820E 01

Figure III - 3

PAGE 1

TTR	MINIMUM 2.8000E 01	TMTL	VERSUS TIME	MAXIMUM 1.9816E 02	T1	T1T1
0.0	2.8000E 01	2.8000E 01		1.9816E 02	2.8000E 01	2.8000E 01
1.0000E 02	3.0774E 01	3.0774E 01			3.0859E 01	3.0634E 01
3.6000E 02	3.4592E 01	3.4592E 01			3.4759E 01	3.4424E 01
5.4000E 02	3.9310E 01	3.9310E 01			3.9524E 01	3.9097E 01
7.2000E 02	4.4612E 01	4.4612E 01			4.4843E 01	4.4381E 01
9.0000E 02	5.0243E 01	5.0243E 01			5.0485E 01	5.0002E 01
1.0300E 03	5.6323E 01	5.6323E 01			5.6270E 01	5.5776E 01
1.2600E 03	6.1850E 01	6.1850E 01			6.2099E 01	6.1602E 01
1.4800E 03	6.7702E 01	6.7702E 01			6.7952E 01	6.7452E 01
1.6200E 03	7.3471E 01	7.3471E 01			7.3717E 01	7.3224E 01
1.8300E 03	7.9137E 01	7.9137E 01			7.9381E 01	7.8895E 01
1.9800E 03	8.3904E 01	8.3904E 01			8.4122E 01	8.3805E 01
2.1600E 03	8.6777E 01	8.6777E 01			8.6878E 01	8.6676E 01
2.3400E 03	8.8482E 01	8.8482E 01			8.8549E 01	8.8416E 01
2.5200E 03	8.9515E 01	8.9515E 01			8.9561E 01	8.9470E 01
2.7000E 03	9.0139E 01	9.0139E 01			9.0171E 01	9.0106E 01
2.8300E 03	9.1261E 01	9.1261E 01			9.1370E 01	9.1153E 01
3.0600E 03	9.4211E 01	9.4211E 01			9.4372E 01	9.4051E 01
3.2400E 03	9.8125E 01	9.8125E 01			9.8317E 01	9.7933E 01
3.4200E 03	1.0261E 02	1.0261E 02			1.0282E 02	1.0240E 02
3.6000E 03	1.0734E 02	1.0734E 02			1.0761E 02	1.0717E 02
3.7800E 03	1.1233E 02	1.1233E 02			1.1235E 02	1.1210E 02
3.9600E 03	1.1744E 02	1.1744E 02			1.1767E 02	1.1721E 02
4.1400E 03	1.2268E 02	1.2268E 02			1.2292E 02	1.2244E 02
4.3200E 03	1.2789E 02	1.2789E 02			1.2813E 02	1.2766E 02
4.5000E 03	1.3304E 02	1.3304E 02			1.3328E 02	1.3281E 02
4.6800E 03	1.3746E 02	1.3746E 02			1.3762E 02	1.3730E 02
4.8600E 03	1.4005E 02	1.4005E 02			1.4016E 02	1.3995E 02
5.0400E 03	1.4162E 02	1.4162E 02			1.4169E 02	1.4154E 02
5.2200E 03	1.4250E 02	1.4250E 02			1.4261E 02	1.4250E 02
5.4000E 03	1.4312E 02	1.4312E 02			1.4317E 02	1.4308E 02
5.5800E 03	1.4424E 02	1.4424E 02			1.4436E 02	1.4412E 02
5.7600E 03	1.4726E 02	1.4726E 02			1.4743E 02	1.4708E 02
5.9400E 03	1.5127E 02	1.5127E 02			1.5147E 02	1.5107E 02
6.1200E 03	1.5509E 02	1.5509E 02			1.5590E 02	1.5548E 02
6.3000E 03	1.6734E 02	1.6734E 02			1.6756E 02	1.6720E 02
6.4800E 03	1.7037E 02	1.7037E 02			1.7112E 02	1.7062E 02
6.6600E 03	1.7639E 02	1.7639E 02			1.7663E 02	1.7612E 02
6.8400E 03	1.8172E 02	1.8172E 02			1.8196E 02	1.8148E 02
7.0200E 03	1.8712E 02	1.8712E 02			1.8738E 02	1.8686E 02
7.2000E 03	1.9212E 02	1.9212E 02			1.9230E 02	1.9194E 02
7.3800E 03	1.9693E 02	1.9693E 02			1.9711E 02	1.9687E 02
7.5600E 03	1.9664E 02	1.9664E 02			1.9673E 02	1.9656E 02
7.7400E 03	1.9700E 02	1.9700E 02			1.9767E 02	1.9754E 02
7.9200E 03	1.9816E 02	1.9816E 02			1.9821E 02	1.9810E 02

Figura III - 4

APÊNDICE IV

CORRELAÇÃO DE DONOHUE PARA COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA
DE CALOR PARA TROCADOR DE CALOR TIPO CARÇAÇA E TUBOS
COM CHICANAS SEGMENTADAS (Ref. 3)

O coeficiente de transferência de calor, em regime turbulento, nos trocadores de calor tipo carcaça-tubos pode ser correlacionado pela expressão

$$\frac{hD}{K} = c \left(\frac{DG}{\mu} \right)^n \left(\frac{C_p \mu}{K} \right)^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

onde: n = 0,8 para fluxo interno aos tubos (lado tubo)

 n = 0,6 para fluxo externo aos tubos (lado casco)

Para fluxo através de seções circulares, o valor de G, velocidade de massa, é simplesmente igual ao fluxo de massa, W, dividido pela área da seção transversal ao fluxo. Contudo, para o fluxo externo aos tubos, a natureza estrutural da passagem apresenta diversas áreas diferentes por onde o fluxo se distribui simultaneamente. O cálculo dessa complexa parcela de fluxo apresenta grandes dificuldades.

O primeiro passo na obtenção do coeficiente de transferência de calor do lado da carcaça de um trocador de calor, a partir de dados experimentais, é o de calcular o coeficiente global de transferência de calor, em Btu/h, dividido pelo produto da superfície externa dos tubos, em pé², pela diferença média logarítmica de temperatura em °F.

O coeficiente global de transferência de calor é composto por cinco coeficientes individuais: fluido externo aos

tubos (do lado da carcaça), depósito da face externa dos tubos, metal dos tubos, depósito na face interna dos tubos e fluido interno aos tubos.

Fazendo-se a soma dos inversos do 2º e 5º coeficiente, e subtraindo-se do valor inverso do coeficiente global de transferência de calor, tem-se obtido o inverso do valor do coeficiente de transferência de calor do lado da carcaça do trocador de calor.

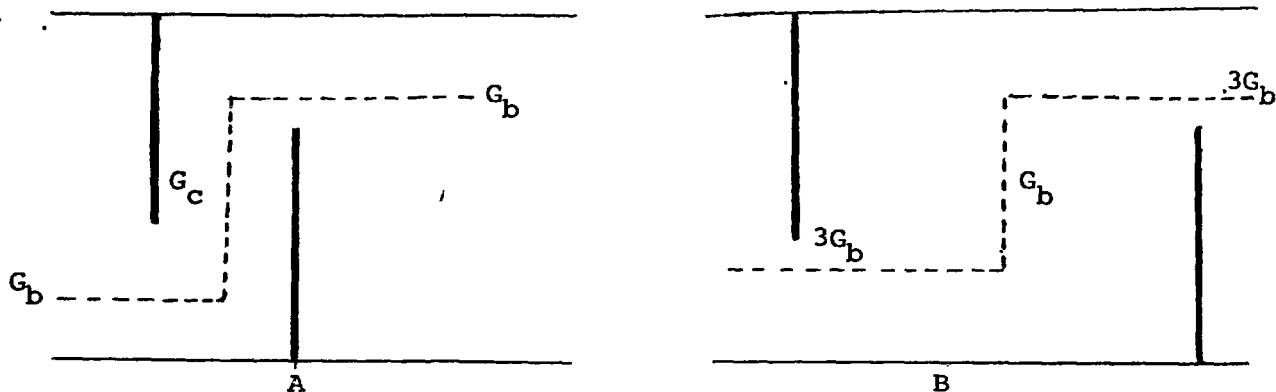
Chicanas Segmentadas

Existem 4 fatores estruturais que influenciam G e consequentemente, h em carcaças com chicanas segmentadas, que são: espaçamento entre chicanas, tamanho da abertura da chicana, áreas de fuga e arranjo dos tubos. O efeito de cada um desses fatores foi analisado separadamente, pela variação de um único fator, enquanto os outros três foram mantidos constantes. Esses experimentos foram realizados por Short e correlacionados pela equação:

$$\frac{hD}{K} = C \left(\frac{D G_c}{\mu} \right)^{0,6} \left(\frac{C_p \mu}{K} \right)^{0,33}$$

Os valores de G_c , (velocidade de massa de fluxo cruzado) foram tomados ao longo do diâmetro do casco, perpendicular ao fluxo. Foi verificado que para G_c constante, o valor de C aumenta com o aumento no espaçamento entre chicanas.

As figuras abaixo representam o caminho do fluxo em um trocador de calor com chicanas segmentadas.



O espaçamento entre chicanas na figura B é três vezes maior que o na figura A, mas todas as demais dimensões (como tamanho da abertura da chicana, número e diâmetro dos tubos e espaçamento entre tubos) são as mesmas.

Quando três vezes mais fluido passa pela unidade da figura B do que na unidade da figura A, a velocidade de massa (G_c), será a mesma em cada unidade. Contudo, como as aberturas das chicanas das unidades de A e B são iguais, a velocidade de massa através da abertura da figura, B é três vezes maior que a velocidade através da abertura da chicana da figura A.

Assim, como as velocidades de massas transversais (G_c) são iguais em cada trocador de calor e a velocidade de massa através da abertura da chicana da figura B é três vezes maior do que a da figura A, fica claro que a unidade B deve ter um coeficiente de transferência de calor (h) maior do que o da unidade A, quando a correlação é baseada em G_c .

Testes experimentais demonstraram que qualquer trocador de calor, no qual a única variável fosse o espaçamento entre chicanas, poderia ser correlacionado pelo uso da velocidade ponderada de massa. Essa velocidade leva em consideração velocidades em dois locais, através do arranjo de tubos e através da abertura da chicana. A área na qual a velocidade ponderada é baseada, é a média geométrica das áreas de fluxo cruzado e de abertura da chicana.

S_{θ} = área de fluxo transversal

S_b = área de abertura da chicana

Velocidade ponderada de massa $G_{\theta} = \frac{W}{S_{\theta}} \sqrt{G_c G_b}$

W → vazão em massa

G_c → velocidade de massa através da seção transversal da carcaça

G_b → velocidade de massa através da abertura da chicana

Portanto, a correlação para o coeficiente de transferência de calor, levando em consideração a variação no espaçamento entre chicanas, é dada pela equação:

$$\frac{hD}{K} = C \left(\frac{DG_{\theta}}{\mu} \right)^{0,6} \left(\frac{Cp\mu}{K} \right)^{0,33}$$

Variações no tamanho da abertura da chicana

O efeito das variações do tamanho da abertura das chicanas no valor de "C" não é tão grande quanto o obtido pelo espaçamento entre chicanas, já que a abertura das chicanas pode variar apenas dentro da faixa de 15 a 45% da área transversal ao fluxo, o que corresponde a valores de C variando de 1 a 1,39.

Variação no arranjo da tubulação

Foi verificado que, em trocadores sem chicanas nos quais o fluxo é paralelo aos tubos, que o coeficiente de transferência de calor é influenciado pelo tipo de arranjo dos tubos na carcaça.

Short correlacionou "C" com os dados relativos à variação no tipo de arranjo dos tubos segundo a expressão:

$$C = 0,19 (De')^0$$

onde De' é o diâmetro hidráulico em polegadas; assim, a correlação para h passa a ser:

$$\frac{hD}{K} = 0,19 (De')^{0,6} \left(\frac{DG\theta}{\mu}\right)^{0,6} \left(\frac{Cp\mu}{K}\right)^{0,33}$$

Gradiente de Viscosidade

Os mais completos dados referentes a operações de aquecimento ou resfriamento em um mesmo trocador de calor, usando óleos de viscosidades bem diferentes foram feitos por Gardner e Siller. Usando a correlação $\frac{hD}{K} = C \left(\frac{DG\theta}{\mu}\right)^{0,6} \left(\frac{Cp\mu}{K}\right)^{0,33}$ para 990 tipos de óleos, eles obtiveram coeficientes de transferência de calor aproximadamente 80% mais altos para operações de aquecimento do que para resfriamento. Todos esses dados foram então correlacionados utilizando-se o gradiente de viscosidade $\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}$, que incorporado à correlação acima resulta:

$$\frac{hD}{K} = C \left(\frac{DG\theta}{\mu}\right)^{0,6} \left(\frac{Cp\mu}{K}\right)^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}$$

Esse efeito é o mesmo verificado para fluidos dentro de tubos.

Conclusão

O coeficiente de transferência de calor do lado da carcaça de um trocador de calor do tipo carcaça com tubos, pode ser correlacionado pela expressão:

$$\frac{hD}{K} = C \left(\frac{DG\theta}{\mu} \right)^{0,6} \left(\frac{Cp\mu}{K} \right)^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

onde C varia com o tipo de unidade e com a velocidade de massa, e sendo $G\theta$ a velocidade média geométrica de massa entre as velocidades de massa através do arranjo de tubos e da abertura da chicana.

NOMENCLATURA

- C - valores numéricos na equação de transferência de calor
- C_p - calor específico, (Bt u/ (lb) ($^{\circ}$ F))
- D - diâmetro externo do tubo (pé)
- D_e - diâmetro equivalente, (pol)
- G - velocidade de massa, (lb/(hr) (pé²))
- G_b - velocidade de massa através da abertura da chicana (lb/(hr) (pé²))
- G_c - velocidade de massa de fluxo cruzado, (libra/hora/pé²)
- G_{θ} - velocidade média geométrica de massa, (lb/(hr) (pé²))
- h - coeficiente de transferência de calor (B.t.u/hr) (pé²) ($^{\circ}$ F)
- k - condutividade térmica, (B.t.u/hr) (pé²) ($^{\circ}$ F)/pé)
- S_b - área da abertura da chicana, (pé²)
- S_c - área de fluxo transversal, (pé²)
- S_{θ} - área ponderada de fluxo, (pé²)
- w - vazão em massa, (lb/hr)
- μ - viscosidade na temperatura média (lb/(hr) (pé))
- μ_w - viscosidade na temperatura da parede do tubo, (lb/(hr) (pé))

APENDICE V

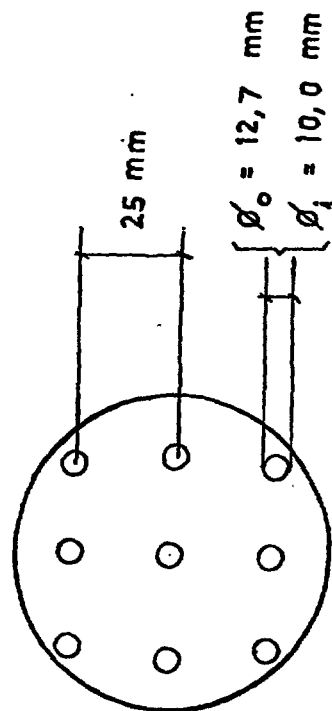
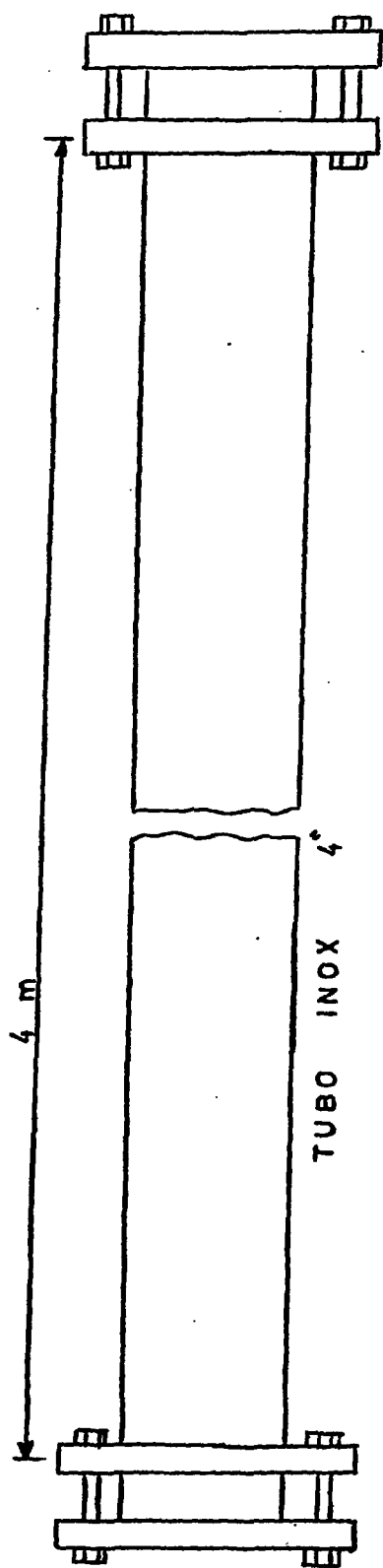


Fig. V - 1 - Seção de Teste

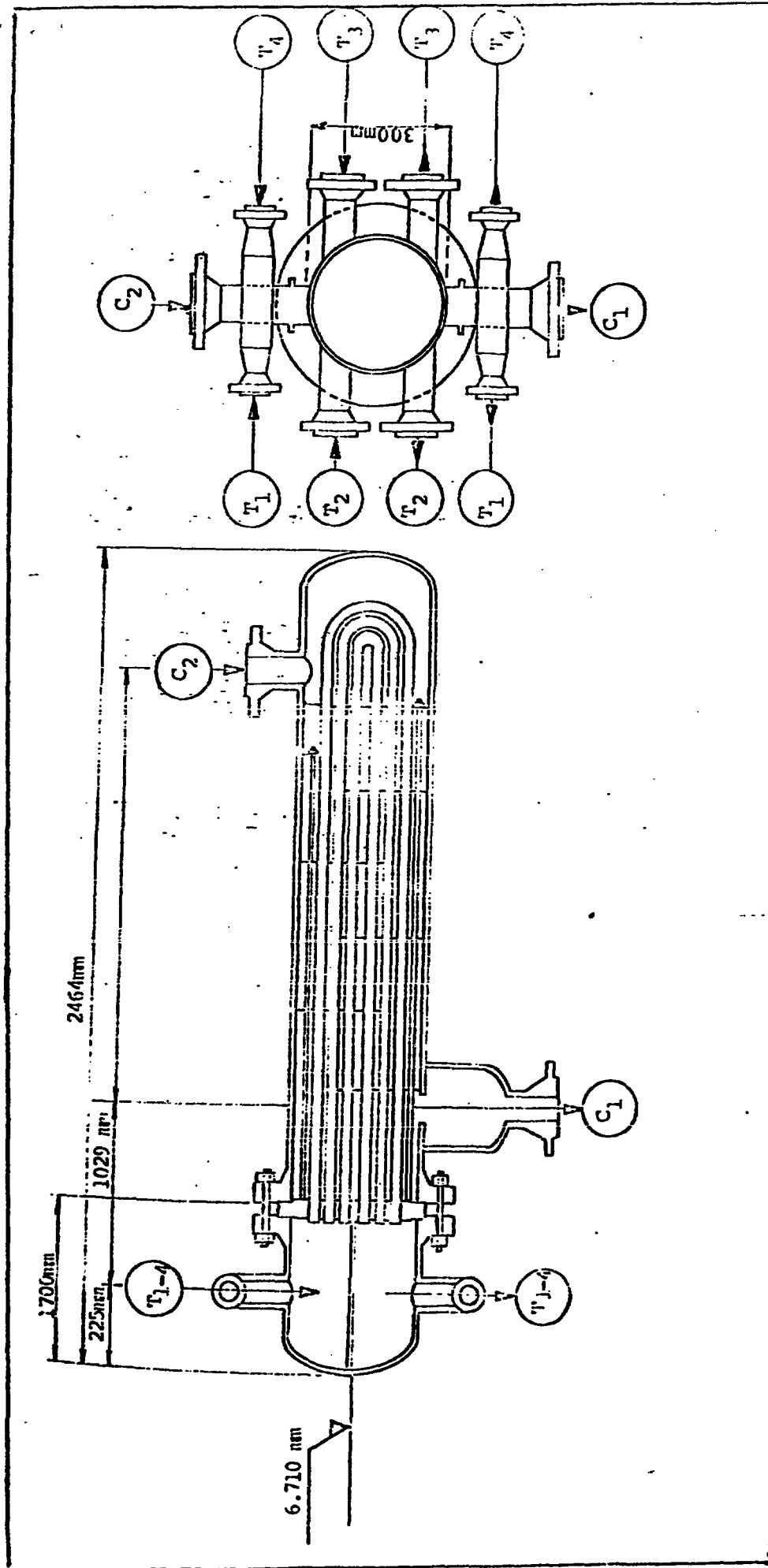


Fig. V- 2 - Resfriador C-101

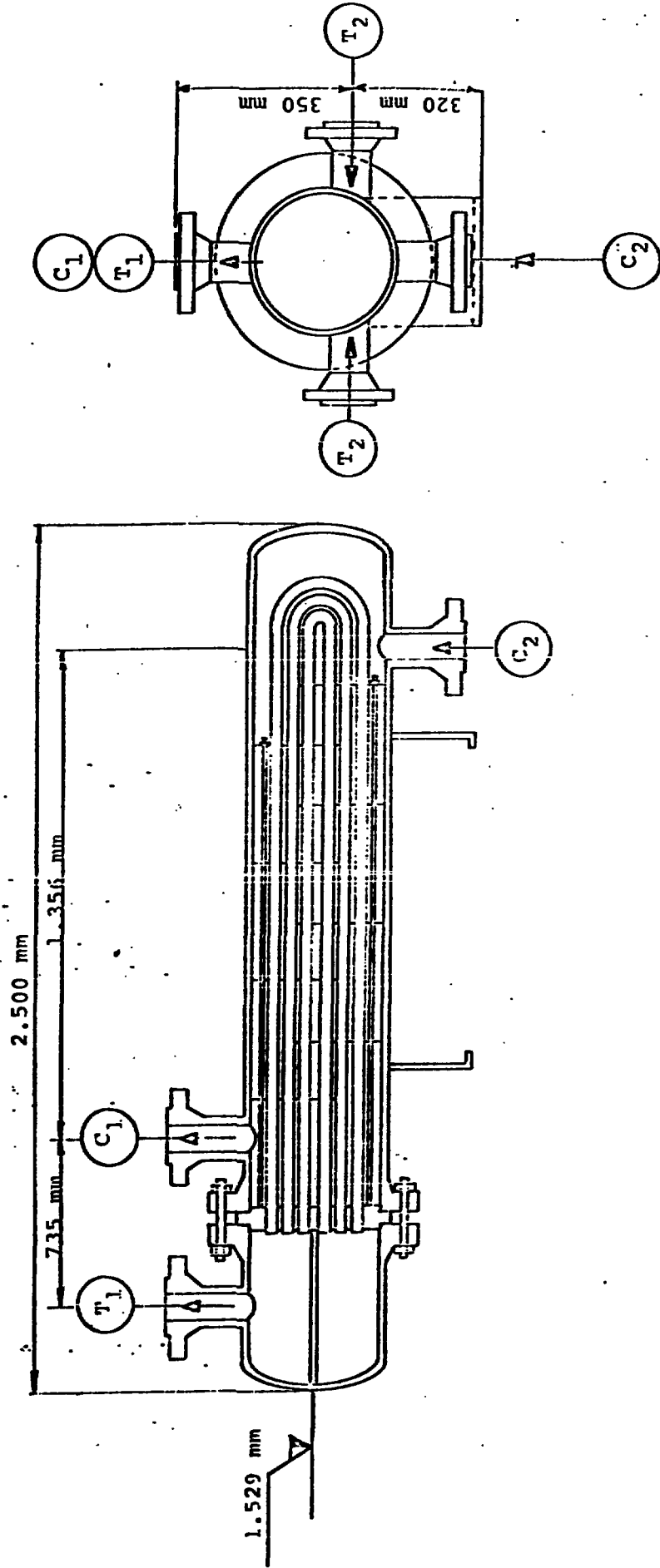


Fig.V- 3 - Resfriador C-102

9/14 11/6 11/6 11/6 11/6

(T) A (C) A

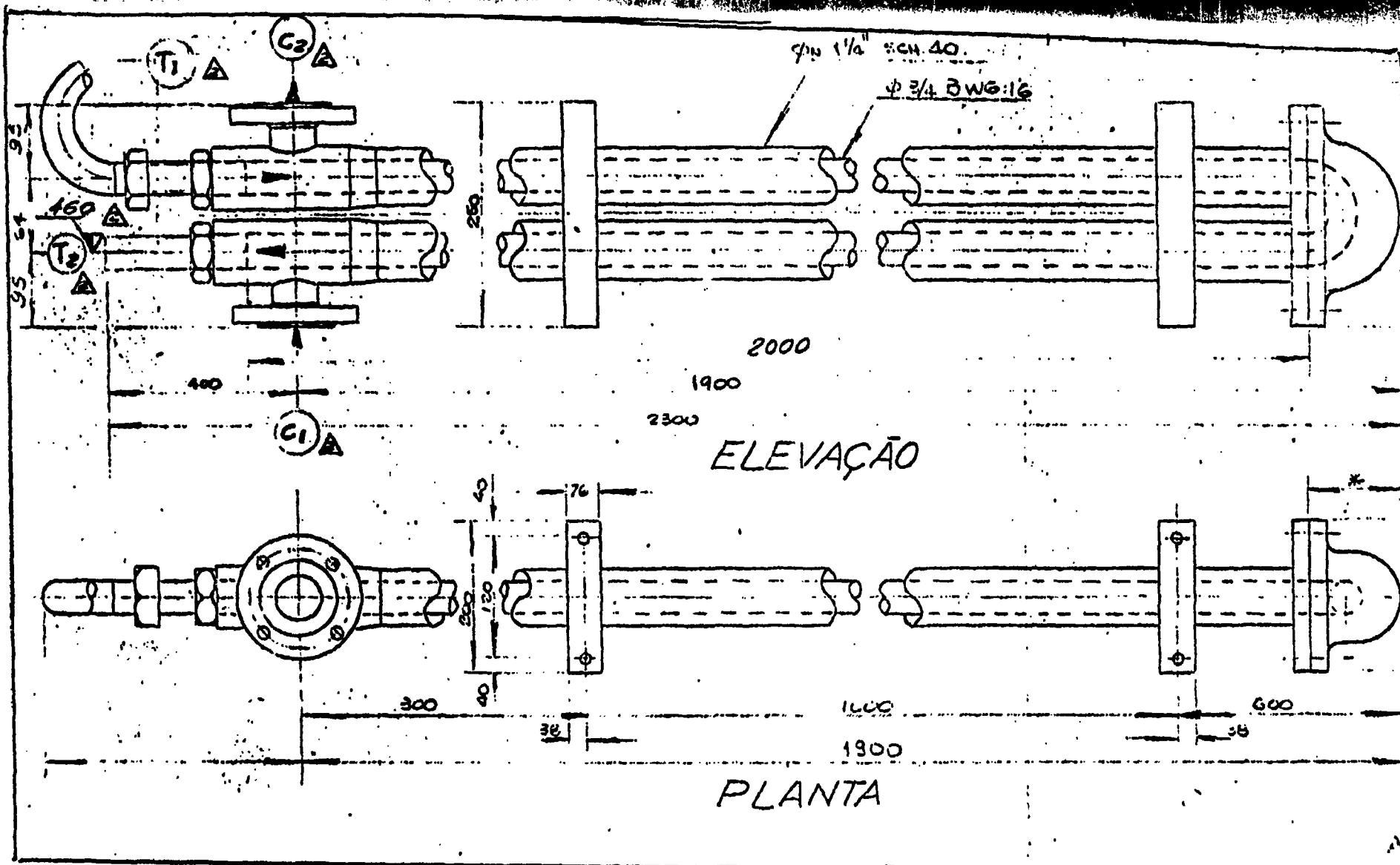


Fig. V. 4 - Resfriador C-103

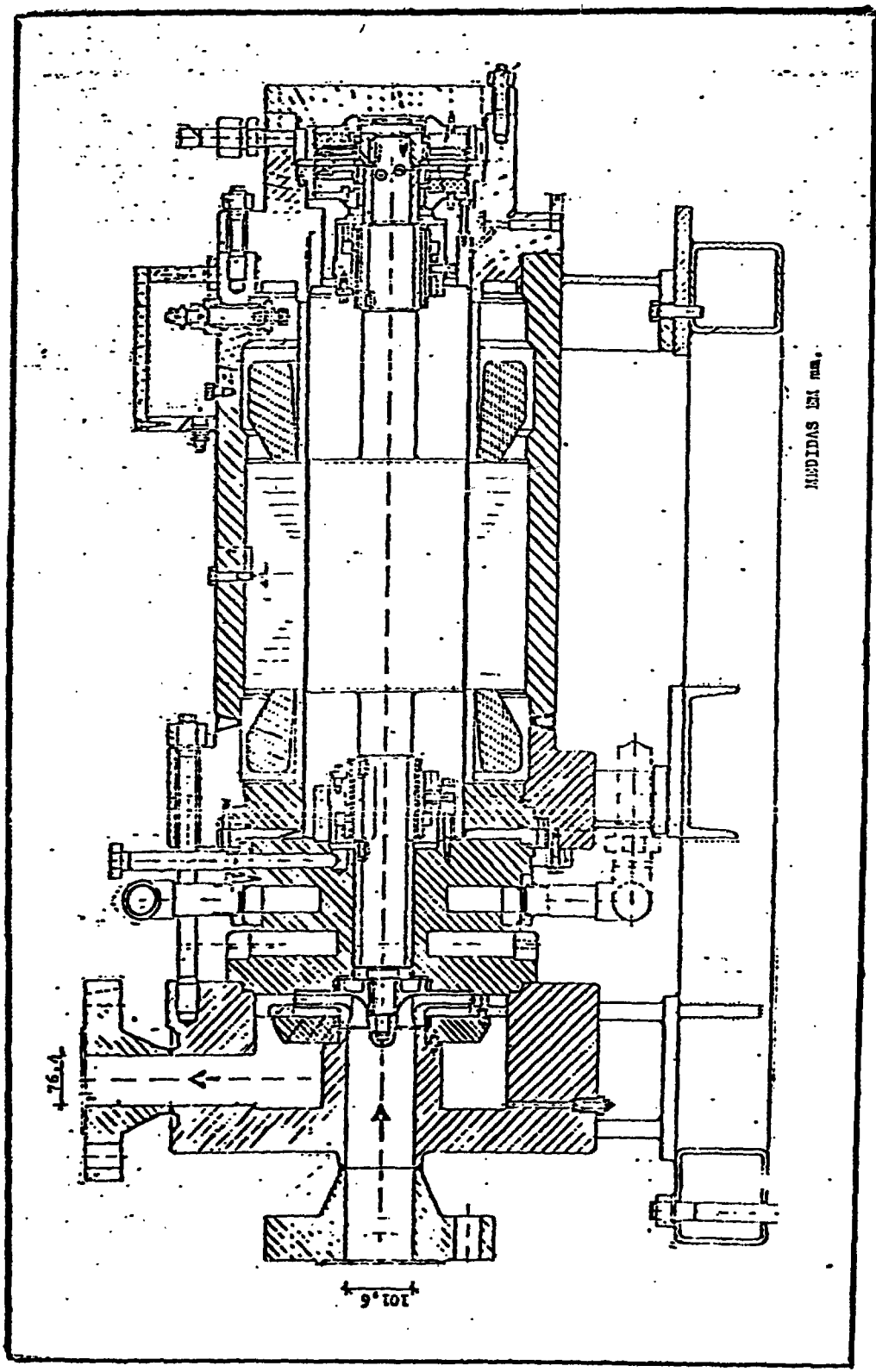


Fig. V - 5 - Bomba Principal P-101

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AEROJET NUCLEAR COMPANY. RELAP 4/MOD. 5: a computer program for transient thermal-hidraulic analysis of nuclear reactors and selected systems. Idaho Falls, Idaho National Engineering Lab., 1976.
2. BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. Transport phenomena. New York, N.Y., Wiley, 1960.
3. DONOHUE, D.A. Heat transfer and pressure drop in heat exchangers. Ind. Engng. Chem., 41(11):2499-2510, 1949.
4. ECKERT, E.R.G.; DRAKE, M.R. Analysis of heat and mass transfer. Tokyo, McGraw-Hill, 1972.
5. HAMMING, R.W. Numerical methods for scientists and engineers. New York, N.Y., McGraw-Hill, 1962.
6. INTERNATIONAL BUSINESS MACHINE, IBM. SYSTEM/360 continous system modeling program. White Plains, N.Y., sem data. (User's Manual, Program Number 360A-CX-16X).
7. INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA. Anteprojeto do circuito experimental de água. São Paulo, IEA, 1975.
8. JAKOB, M. Heat transfer. New York, N.Y., Wiley, 1964.
9. KREIT, F. Princípios de transmissão de calor. São Paulo, Edgard Blucher, 1977.
10. LUDWIG, E. Applied process design for chemical and petrochemical plants. III "V". Houston, Texas, Gulf Publishing Company, 1965.
11. McAdams, W.H. Heat transmission. 3.ed. New York, N.Y., McGraw-Hill, 1954.
12. ETHERINGTON, H. Nuclear engineering handbook. 1.ed. New York, N.Y., McGraw-Hill, 1958.

13. PORCHING, T.A.; MURPHY, J.M.; REDFIELD, J.A. FLASH-4: a fully implicit FORTRAN.IV program for the digital simulation of transients in reactor plant. Pittsburg, Bettis Atomic Power Lab., 1969. (WAPD-TM-840).