UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

EST. DO DESEMP. DE REGENERAD. EM CONTRA-CORRENTE PELA ANÁL. TRANSIENTE

Guaratinguetá
1992

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ
DEPARTAMENTO DE ENERGIA

ESTUDO DO DESEMPENHO DE REGENERADORES EM CONTRA-CORRENTE PELA ANÁLISE TRANSIENTE

MESSIAS BORGES SILVA

020

000217 217

GUARATINGUETÁ, 1992

ESTUDO DO DESEMPENHO DE REGENERADORES EM CONTRA CORRENTE PELA ANALISE TRANSIENTE

MESSIAS BORGES SILVA

ESTA DISSERTAÇAO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇAO DO TITULO DE "MESTRE EM ENGENHARIA MECANICA"

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECANICA, AREA DE CONCENTRAÇAO EM TRANSMISSAO E CONVERSAO DE ENERGIA - APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE POS-GRADUAÇAO

Prof. Dr. PAULO MAGALHAES FILHO

Prof. Dr. CARLOS DANIEL EBINUMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. PAULO MAGALHAES FILHO

Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI

Prof. Dr. GILBERTO LUIZ JARDIM P. DA SILVA

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ
DEPARTAMENTO DE ENERGIA

ESTUDO DE DESEMPENHO DE REGENERADORES EM CONTRA-CORRENTE PELA ANÁLISE TRANSIENTE

UTOR : MESSIAS BORGES SILVA
RIENTADOR : PROF.DR.PAULO MAGALHÃES FILHO

TRABALHO APRESENTADO À COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

T 536.24(043)
S 586e

000217

MAIO/92

FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

AGRADECIMENTOS

A Deus e aos meus mentores espirituais pela oportunidade concedida e pela orientação.

Ao Prof.Dr.Paulo Magalhães Filho, por ter-me aceito como seu orientado e pela paciência e amizade dedicados nestes anos de desenvolvimento do projeto.

Ao Prof.Henrique Otávio Queiroz de Aquino pela ajuda na parte computacional.

Ao Prof. Rene Kattar pela ajuda no 'start-up' na análise numérica.

Ao meu irmão Evaldo Borges Silva pelo empenho e amizade demonstrados nos serviços datilográficos.

A minha espôsa Adriana pela tolerância para comigo na fase final do projeto.

DEDICO ESTE TRABALHO A MINHA MÃE, MEUS FILHOS, MEUS IRMÃOS, MINHA ESPOSA E À MEMÓRIA DE MEU PAI.

RESUMO

No presente trabalho é feito um estudo sobre trocadores de calor-armazenadores por calor sensível através da análise em regime transitório. O material utilizado para troca de calor e armazenamento é um cilindro oco sólido e os fluidos de transporte, quente e frio, escoam em contra-corrente nas superfícies interna e externa do cilindro.

Para a formulação do problema no material armazenador é escrita a equação da energia, em coordenadas cilíndricas, considerando que o problema de transferência de calor é controlado pela amplitude do número de Biot.

A solução das equações é obtida por método numérico, utilizando-se a técnica das diferenças finitas.

O problema é estudado inicialmente, com a temperatura de entrada do fluido quente constante. Posteriormente o mesmo problema é estudado introduzindo uma variação na temperatura de entrada do fluido quente com o tempo. Os resultados obtidos são comparados com os do estudo inicial através de parâmetros tais como : efetividade, desempenho, tempo e espessura do cilindro.

ABSTRACT

In the present work a study about sensible heat storage exchanger through transient analysis is made. The storage and heat exchange material is one hollow tube and the hot and cold transport fluids drips in counterflow.

The sensible heat storage exchanger formulation problem is done by the energy equation written in the cilindrical coordinates, considering the heat exchange problem is controlled by Biot range number.

The differential equations are solved numerically through the use of finite differences.

In the begin the problem is studied wich a constant inlet hot fluid temperature. After the same problem is studied to introducing a change in the inlet hot fluid temperature. The results are compared through parameters like : effectiveness, performance, time and material thickness.

SIMBOLOGIA

a	→ variável independente	-
A_f	→ área de troca de calor com fluido frio	L^2
A_q	→ área de troca de calor com fluido quente	L^2
A	→ constante auxiliar	θ^{-1}
B	→ constante auxiliar	θ^{-1}
B_{iq}	→ número de Biot do fluido quente	1
B_{if}	→ número de Biot do fluido frio	1
C	→ parâmetro adimensional	1
C^*	→ constante auxiliar	θ^{-1}
c	→ calor específico genérico	$L^2\theta^{-2}T^{-1}$
CAT	→ capacidade térmica	$ML^{-1}T^{-1}\theta^{-2}$
c_{fq}	→ calor específico do fluido quente	$L^2\theta^{-2}T^{-1}$
c_{ff}	→ calor específico do fluido frio	
c_m	→ calor específico do material armazenador	$L^2\theta^{-2}T^{-1}$
D	→ constante auxiliar	θ^{-1}
D	→ parâmetro adimensional	1
Di	→ diâmetro interno	L
f	→ função	-
i	→ termo da matriz ou direção ordenada	-
j	→ termo da matriz ou direção ordenada	-
k	→ variável independente genérica	-
k_m	→ coeficiente de condutibilidade térmica do material armazenador	$ML\theta^{-3}T^{-1}$
L	→ comprimento	L

m_{ff}	→ vazão mássica de fluido frio	$M\theta^{-1}$
m_{fq}	→ vazão mássica de fluido quente	$M\theta^{-1}$
M	→ número de pontos	-
M_m	→ massa do material armazenador	M
n	→ número de variáveis independentes	-
N	→ número de pontos	-
Nu	→ número de Nusselt	1
Nu_{xff}	→ número de Nusselt local de fluido frio	1
Nu_{xfq}	→ número de Nusselt local de fluido quente	1
NR	→ número de pontos ao longo do raio	-
NX	→ número de pontos ao longo do comprimento	-
Pe	→ número de Peclet	1
Pr_{ff}	→ número de Prandtl do fluido frio	1
Pr_{fq}	→ número de Prandtl do fluido quente	1
P_1	→ perímetro da seção externa do tubo armazenador	L
P_2	→ perímetro da seção interna do tubo armazenador	L
$\bar{Q}$	→ calor médio armazenado	$ML^2\theta^{-2}$
Q_{ac}	→ calor acumulado no material armazenador	$ML^2\theta^{-2}$
Q_{ffq}	→ calor fornecido pelo fluido quente	$ML^2\theta^{-2}$
Q_{max}	→ calor teórico máximo armazenável	$ML^2\theta^{-2}$
Q^+_{max}	→ calor máximo trocado	$ML^2\theta^{-2}$
Q^*	→ parâmetro adimensional	1
$Qreal_{ff}$	→ calor trocado com o fluido frio	$ML^2\theta^{-2}$
Qr_{ff}	→ calor recebido pelo fluido frio	$ML^2\theta^{-2}$
$Qreal_{fq}$	→ calor real trocado com o fluido quente	$ML^2\theta^{-2}$
Q_θ	→ calor parcial armazenado	$ML^2\theta^{-2}$

r	→ raio genérico do tubo	L
r_{ex}	→ raio externo	L
r_i	→ raio interno	L
r_1	→ raio interno do tubo armazenador	L
r_2	→ raio externo do tubo armazenador	L
R	→ parâmetro adimensional	1
R^*	→ parâmetro adimensional	1
Re	→ número de Reynolds	1
S_i	→ área da seção interna do tubo	L^2
$\bar{t}_b$	→ temperatura média da mistura	T
$\bar{t}_{fqi}$	→ temperatura média de referência do fluido quente na entrada do tubo	T
$\bar{t}_{ffi}$	→ temperatura média de referência do fluido frio na saida do tubo (entrada do fluido frio)	T
$\bar{t}_{fqs}$	→ temperatura média de referência do fluido quente na saida do tubo	T
t_i	→ temperatura da superfície interna do tubo armazenador	T
t_m	→ temperatura do material armazenador	T
$\bar{t}_m$	→ temperatura média do material armazenador	T
t_p	→ temperatura de parede	T
t_o	→ temperatura do material armazenador no instante zero	T
$\bar{t}_o$	→ temperatura média do material armazenador no instante zero	T
T	→ temperatura genérica	T
T	→ parâmetro adimensional	1

T_{ff}	→ parâmetro adimensional para o fluido frio	1
t_{fq}	→ parâmetro adimensional para o fluido quente	1
T_m	→ parâmetro adimensional para o material armazenador	1
U	→ parâmetro adimensional para os raios	1
$\bar{v}$	→ velocidade média do fluido	$L\theta^{-1}$
v_1	→ velocidade média do fluido frio	$L\theta^{-1}$
v_2	→ velocidade média do fluido quente	$L\theta^{-1}$
V	→ volume genérico	L^3
V	→ volume do material armazenador	L^3
x	→ sentido longitudinal	-
x	→ comprimento genérico	L
X	→ parâmetro adimensional	1
X*	→ parâmetro adimensional	1
Z	→ solução da equação diferencial	-
Z*	→ resultado numérico da eq.diferencial	-

SIMBOLOS GREGOS

α	→ difusividade térmica do material armazenador	$L^2\theta^{-1}$
β	→ desempenho do armazenador	1
γ	→ valor máximo do erro introduzido	-
Δ	→ incremento	-
Δ_θ	→ incremento do tempo computacional	θ

ε	→ efetividade	1
η	→ parâmetro adimensional de tempo	1
θ	→ tempo genérico	θ
θ_o	→ tempo de duração do ensaio	θ
∇	→ operador	-
λ	→ parâmetro adimensional	1
μ_b	→ viscosidade dinâmica do fluido para t_b	$ML^{-1}\theta^{-1}$
μ_p	→ viscosidade dinâmica do fluido para t_p	$ML^{-1}\theta^{-1}$
ξ	→ parâmetro adimensional de comprimento	1
ρ	→ massa específica genérica	ML^{-3}
ρ_f	→ massa específica do fluido	ML^{-3}
ρ_m	→ massa específica do material armazenador	ML^{-3}
ρ_{ff}	→ massa específica do fluido frio	ML^{-3}
ρ_{fq}	→ massa específica do fluido quente	ML^{-3}
τ	→ tempo genérico	θ

INDICE

- RESUMO..... iii

- ABSTRACT..... iv

- SIMBOLOGIA..... v

PÁG.

1 Introdução..... 1

1.1 Antecedentes Históricos..... 1

1.2 Utilização de Dispositivos Armazenadores de Energia..... 5

1.3 Áreas Específicas de Aplicação do Armazenamento de Energia..... 6

1.4 Seleção do Tipo de Energia a ser Armazenada... 7

1.5 Unidades de Armazenamento de Energia..... 8

1.6 Unidades de Armazenamento de Calor Sensível... 8

1.7 Identificação do Problema..... 9

1.8 Fatores Influentes na Identificação do modelo..... 11

2 A Modelagem Teórica..... 16

2.1 Descrição Teórica do Problema..... 16

2.2 Equações Utilizadas na Modelagem..... 18

3	Método Numérico e Computacional.....	38
3.1	Estabelecimento do Reticulado.....	38
3.2	Obtenção da Equação de Diferenças.....	41
3.3	As Equações das Diferenças Finitas para cada Condição de Contorno.....	46
3.4	Verificação das Condições de Erros e Estabilidade do Método Explícito Utilizado.....	50
3.5	O Programa Computacional.....	54
4	Roteiro de Cálculos para Determinação do Desempenho e do Calor Armazenado.....	55
4.1	Seleção dos Modelos Teóricos.....	55
4.2	Determinação do Coeficiente de Película (h)...	56
4.3	Roteiro de Cálculo para o Calor Armazenado....	57
4.4	Determinação da Efetividade.....	59
4.5	Determinação do Desempenho do Armazenador.....	60
5	Resultados.....	62
5.1	Especificação dos Materiais Utilizados.....	62
5.2	Condições Utilizadas para Operacionalizar o Programa.....	62
5.3	Resultados do Programa MECONS 1.....	63
5.3.1	Discussões sobre os Resultados do MECONS 1....	66
5.4	Resultados do Programa MECONS 2.....	68
5.4.1	Discussões sobre os Resultados do MECONS 2....	71

5.5 Resultados do Programa MECONS 3..... 72

5.5.1 Discussões sobre os Resultados do MECONS 3.... 75

5.6 Resultados do Programa MEVAR 1..... 76

5.6.1 Discussões sobre os Resultados do MEVAR 1..... 79

5.7 Resultados do Programa MEVAR 2..... 81

5.7.1 Discussões sobre os Resultados do MEVAR 2..... 84

5.8 Resultados do Programa MEVAR 3..... 85

5.8.1 Discussões sobre os Resultados do MEVAR 3..... 88

5.9 Resultados Comparativos entre o Calor Armazenado..... 89

5.9.1 Discussões..... 91

6 Conclusões..... 93

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 95

APÊNDICES :

PÁG.

A. Listagem do Programa de Computador..... 100

B. Exemplo de Arquivo de Saída MECONS 1..... 136

C. Exemplo de Arquivo de Saída MECONS 2..... 138

D. Exemplo de Arquivo de Saída MECONS 3..... 140

E. Exemplo de Arquivo de Saída MEVAR 1..... 142

F. Exemplo de Arquivo de Saída MEVAR 2..... 145

G. Exemplo de Arquivo de Saída MEVAR 3..... 149

INDICE DE FIGURAS

PÁG.

Figura 1 Unidade Armazenadora..... 17

Figura 2 Esquema para o Balanço Energético..... 19

Figura 3 Seção Longitudinal no Sistema de Coordenadas Cilíndricas..... 39

Figura 4 Representação da Matriz T(i,j)..... 40

Figura 5 Malha Representativa da Posição dos Nós... 45

Figura 6 Esquema Utilizado para o Cálculo do Calor Armazenado..... 57

ÍNDICE DE TABELAS

PÁG.

Tabela 5.1 Especificações dos Materiais a 300K..... 62

Tabela 5.2 Condições dos Programas Computacionais... 63

GRÁFICOS

PÁG.

Gráfico 1 Distribuição de temperatura adimensional em Função do tempo para o Programa MECONS 1..... 63

Gráfico 2 Calor Armazenado Porcentual em Função do Tempo para o Programa MECONS 1..... 64

Gráfico 3 Calor Armazenado, Efetividade e Desempenho em Função do Tempo para o Programa MECONS 1..... 65

Gráfico 4 Distribuição de temperatura adimensional em Função do Tempo para o Programa MECONS 2..... 68

Gráfico 5 Calor Armazenado Porcentual em Função do Tempo para o Programa MECONS 2..... 69

Gráfico 6 Calor Armazenado, Efetividade e Desempenho em Função do Tempo para o Programa MECONS 2..... 70

Gráfico 7 Distribuição de temperatura adimensional em Função do Tempo para o Programa MECONS 3..... 72

Gráfico 8 Calor Armazenado Porcentual em função do Tempo para o Programa MECONS 3..... 73

Gráfico 9 Calor Armazenado, Efetividade e Desempenho em Função do Tempo para o Programa MECONS 3..... 74

Gráfico 10 Distribuição de temperatura adimensional em Função do Tempo para o Programa MEVAR 1..... 76

Gráfico 11 Calor Armazenado Porcentual em Função do Tempo para o Programa MEVAR 1..... 77

Gráfico 12 Calor Armazenado, Efetividade e Desempenho em Função do tempo para o Programa MEVAR 1..... 78

Gráfico 13 Distribuição de temperatura adimensional em Função do Tempo para o Programa MEVAR 2..... 81

Gráfico 14 Calor Armazenado Porcentual em Função do Tempo para o Programa MEVAR 2..... 82

Gráfico 15 Calor Armazenado, Efetividade e Desempenho em Função do tempo para o Programa MEVAR 2..... 83

Gráfico 16 Distribuição de temperatura adimensional em Função do Tempo para o Programa MEVAR 3..... 85

Gráfico 17 Calor Armazenado Porcentual em Função do Tempo para o Programa MEVAR 3..... 86

Gráfico 18 Calor Armazenado, Efetividade e Desempenho em Função do Tempo para o Programa MEVAR 3..... 87

Gráfico 19 Influência da Espessura do Cilindro no Calor Armazenado em Função do Tempo para os Programas MECONS..... 89

Gráfico 20 Influência da Espessura do Cilindro no Calor Armazenado em Função do Tempo para os Programas MEVAR..... 90

CAPÍTULO I

CAPITULO 1

1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Nas últimas duas décadas, energia e crise aparecem juntas. Acredita-se que a crise energética tenha se iniciado em outubro de 1973, quando o cartel dos países exportadores de petróleo, a OPEP, deflagrou a elevação brutal dos preços desse material energético. No ano de 1971, o relatório do Clube de Roma sobre os limites do desenvolvimento, alertou para o fato de que as jazidas de petróleo se esgotariam em poucas décadas. Embora elas não tenham ainda se esgotado, a elevação dos preços entre 1973 e 1981, teve o mesmo efeito sobre a economia mundial que teria a escassez resultante desse processo de esgotamento das jazidas.

No entanto, as economias dos países industrializados não só aguentaram bem o choque como dividiram a aliança da OPEP, que parecia indissolúvel. Oito anos depois do início da crise, os preços do petróleo, fazendo uma trajetória inversa, caíram, em poucos meses, de 37 para menos de 30 dólares o barril, o que gerou um certo otimismo nos países industrializados.

A queda dos preços obrigou a OPEP a diminuir sua produção, pois verificou-se uma retração no mercado consumidor de petróleo, devido em parte a reprogramação de consumo dos países carentes, que eliminaram gastos inúteis através de programas de racionalização do uso ou utilizaram fontes alternativas.

Como consequência, soluções paliativas, como apenas

aumentar a produção de petróleo, foram reduzidas em nome de projetos de pesquisa sobre economia de energia cujos resultados já estão sendo aplicados. Entre esses projetos, encontram-se os que se voltam a recuperação da energia térmica, campo de investigação deste trabalho.

Neste sentido, tem-se determinado que é economicamente necessário desenvolver sistemas que possam utilizar racionalmente a energia, bem como recupera-la e explorar, com mais intensidade as fontes alternativas de energia para reduzir ainda mais a dependência em relação as nações produtoras de petróleo.[1]

No Brasil, um estudo que teve por objetivo identificar a parcela de energia útil contida no consumo final de energia dos diversos setores da economia [2], revelou que 56% da oferta interna bruta, se perderam na transformação, na distribuição, na armazenagem ou no uso final. O estudo, conforme consta de sua apresentação, se constituiu, por certo, em um dos principais instrumentos para auxiliar a implantação de programas de substituição e conservação de energia, permitindo a identificação dos setores de atividade energeticamente menos eficiente, bem como as formas de energia utilizadas com menor eficiência.

Registra-se ainda que, nas duas últimas décadas no Brasil, esforços têm sido dedicados ao desenvolvimento e ao uso de fontes alternativas de energia, sendo o Álcool Etílico o carro chefe.

Simultaneamente, trabalhos mais especificamente voltados a recuperação e armazenamento de energia na forma de calor

sensível ou calor latente têm sido desenvolvidos [3] [4] [5].

Tendo em vista a recuperação e o melhor aproveitamento de energia térmica das mais variadas fontes, utilizam-se armazenadores térmicos.

Pode-se armazenar energia térmica essencialmente de duas formas :

a - Por Calor Latente : a substância armazena energia calorífica por mudança de estado físico. Os armazenadores por calor latente são mais compactos que os por calor sensível, pois tendo em vista o fato de que os calores de fusão da maioria das substâncias armazenadoras serem maior que o produto do calor específico pela diferença de temperatura;

b - Por Calor Sensível : a substância armazenadora experimenta variações de temperatura.

Neste trabalho a ênfase será dada aos processos de armazenamento e recuperação da energia e as variadas aplicações dos princípios de armazenamento de calor em sólidos, através do uso de regeneradores, que são trocadores de calor onde o fluido quente e o fluido frio estão separados por uma parede sólida. Alternativamente o mesmo espaço físico pode ser ocupado pelo fluido quente e pelo fluido frio [6].

Os regeneradores são geralmente empregados para pré-aquecimento de ar para plantas de vapor e altos-fornos. Na indústria química, destaca-se o emprego dos regeneradores nos

fornos de produção de vidro, em alguns tipos de reatores químicos, na produção de oxigênio, na separação de gases a baixas temperaturas e na secagem de finos. Outras possibilidades de uso, como aquecimento e condicionamento de ar em edifícios , e o desenvolvimento de sistemas de energia solar, também justicam a necessidade da recuperação e armazenamento de energia.

Uma revisão bibliográfica geral mostra que até 1920 praticamente não se tinha ou era muito pequena a quantidade de trabalhos sobre projeto e desempenho de dispositivos de recuperação de calor.

A partir daí, foram publicados trabalhos importantes como os de Hausen [7] 1929; Karison e Holm [8] 1943; Coppage e London [9] 1953;Lambertson [10]1953; Harper e Rohsenow [11] 1953; Harper [12] 1957; London [13]Gibbs [14] 1969; Polland [15] 1970;Goldstern [16] 1970; Gibbs [17] 1971; Fielld [18] 1971; Glenn [19] 1976; Lorsch et alli [20] 1976; Reay [21] 1977; Schimidt e Willmott [1] 1981.

Como já mencionado, este trabalho discorrerá sobre o armazenamento e recuperação de calor, usando um sólido como meio para o armazenamento de calor, sendo que este meio estará simultaneamente em contato com um fluido quente e um fluido frio.

No sistema descrito acima, a unidade de armazenamento utiliza somente calor sensível num material estacionário.

Tem sido amplamente reconhecido que é mais efetivo

termicamente utilizar fluidos de transporte, trocando calor em direções opostas durante o processo de armazenamento e recuperação [6]. Neste sentido, são utilizados os regeneradores em contra corrente. Tradicionalmente estes regeneradores têm sido empregados como trocadores de calor, no pré-aquecimento de ar para processos de combustão, e em diversos tipos de equipamentos de refrigeração.

Com o intuito de trabalhar com um sistema que aproveite da melhor forma a energia disponível, optaremos por um regenerador operado com os fluidos quente e frio em contra corrente.

1.2 UTILIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS ARMAZENADORES DE ENERGIA

Em 1975, o Energy Research and Development Administration (ERDA) do Governo dos Estados Unidos da América solicitou ao National Research Council (NRC) que se encarregasse de estudar o potencial de sistemas avançados de armazenamento de energia. O relatório, publicado em 1976 [22], indicou que as decisões sobre a instalação de sistemas de armazenamento de energia deveriam se basear nas seguintes características :

1. Capacidade de armazenamento
2. Taxa de carregamento e descarregamento
3. Tempo de vida
4. Peso, volume e outros limites físicos
5. Parâmetros críticos de segurança
6. Padrões ambientais
7. Capital e custos de operação disponíveis

1.3 ÁREAS ESPECÍFICAS DE APLICAÇÃO DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

1.3.1 Utilidades Elétricas : Nesta área, a energia é armazenada durante os períodos dos horários de pico e repassada para o sistema durante os períodos de alta demanda.

1.3.2 Residencial/Comercial : Nos Estados Unidos da América e Europa, cerca de 85% do uso para fins comerciais/residenciais está reservado a aplicações térmicas [1].

Estes tipos de sistemas de armazenamento envolvem instalações individuais e usualmente utilizam materiais cerâmicos que são aquecidos durante os períodos fora dos horários de pico com custos econômicos.

1.3.3 Aplicações Industriais : Em 1919 a Alemanha reconheceu a importância econômica de recuperar energia no campo industrial. Ao mesmo tempo, o Institute of Fuel Economy (IFE) foi estabelecido em Dusseldorf. Em 1931, o Institute of Fuel da Grã Bretanha premiou o Dr. Kurt Rummel diretor do IFE como reconhecimento pelos significativos avanços teóricos e experimentais feitos em termos de recuperação de calor perdido na indústria através do uso de regeneradores. Muitos destes resultados ainda são utilizados nos dias de hoje.

1.4 SELEÇÃO DO TIPO DE ENERGIA A SER ARMAZENADA

Como a energia aparece nas mais variadas formas, o primeiro passo na seleção da unidade de armazenamento é no sentido de determinar o tipo de energia a ser armazenada. A lista abaixo inclui os diversos tipos :

1. Energia Potencial - o bombeamento de água a alturas elevadas usando energia elétrica fora dos períodos de pico é a aplicação mais comum deste tipo de armazenamento. Outra aplicação comum é o armazenamento de ar comprimido.

2. Energia Química - a produção de hidrogênio para uso futuro em processos de combustão é um primeiro exemplo deste tipo de armazenamento. o hidrogênio pode estar na fase líquida ou gasosa. O armazenamento de energia em pilhas também se enquadra nesta modalidade.

3. Energia Cinética - a forma mais comum de armazenagem de energia cinética é o volante.

4. Campo Eletromagnético - a energia é armazenada em capacitores ou magnetos supercondutores.

5. Energia Térmica - diferentes tipos de dispositivos se enquadram nesta modalidade. São exemplos, o armazenamento de vapor a alta pressão, a utilização de calor sensível de um líquido ou um sólido, utilização de calor de fusão ou evaporação, calor de hidratação, etc. .

Todas essas formas de armazenamento de energia têm suas

vantagens e limitações. Nosso trabalho abordará especificamente o armazenamento de energia térmica aplicada aos regeneradores de calor sensível de um sólido.

1.5 UNIDADES DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

São características desejáveis para os materiais armazenadores :

1. Alto calor específico
2. Alta difusividade térmica
3. Alta densidade
4. Resfriamento e aquecimento reversível
5. Estabilidade química e geométrica
6. Não Inflamabilidade, baixa corrosividade e toxidade
7. Baixo custo de fabricação
8. Suficiente resistência mecânica

1.6 UNIDADES DE ARMAZENAMENTO DE CALOR SENSIVEL

Existem dois tipos de unidades de armazenamento de calor sensível. Um envolve sistemas em que o material armazenador também serve como fluido transportador de energia. O outro envolve unidade de armazenamento que requer um sistema fluido separador para transportar a energia de um local para outro. Este último tipo de unidade é algumas vezes mais complexo, em função de serem requeridos uma superfície de troca de calor e uma diferença de temperatura entre o fluido e a superfície do material armazenador.

1.7 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Na otimização de sistemas energéticos, o armazenamento de calor tem assumido paulatinamente uma importância incontestável. Neste quadro se insere o presente trabalho, voltado para a análise do armazenamento térmico por calor sensível em materiais sólidos.

Muitos problemas práticos, em que a temperatura e o fluxo de calor podem ser considerados como funções de uma única variável, são solucionados aplicando-se um enfoque unidimensional em regime permanente. Por outro lado, quando os contornos de um sistema são irregulares ou quando a temperatura ao longo de um contorno não é uniforme, o tratamento unidimensional pode deixar de ser satisfatório. Em tais casos, a temperatura é uma função de duas e possivelmente até três coordenadas, e também função do tempo.

O calor conduzido através das paredes de um cilindro curto de parede espessa é um exemplo típico dessa classe de problema. Para que as condições de regime permanente possam ser alcançadas, deve transcorrer algum tempo depois de iniciado o processo de transmissão de calor, para permitir que as condições transitórias desapareçam.

Para condução de calor transitória em muitas formas simples, sujeitas a condições de contorno de importância prática, a distribuição de temperatura e o fluxo de calor foram calculados

e os resultados foram apresentados por BOELTER [21].

Considerações importantes devem ser avaliadas no momento de se definir e assumir situações reais que possibilitem a proximidade da formulação matemática. Uma delas diz respeito a temperatura do fluido escoando numa interface líquido-sólido; na realidade apenas quando está havendo mudança de fase é que a temperatura do fluido não muda. Em muitas ocasiões, contudo, a variação de temperatura que ocorre no fluido é pequena devido a sua alta capacidade térmica.

Se a maior resistência a transferência de calor é oferecida pela película convectiva na interface líquido-sólido, o gradiente de temperatura dentro do sólido pode ser muito pequeno, ou seja, todo o material armazenador poderá estar a uma mesma temperatura. Quando isso acontece, o calor armazenado em uma unidade ou sistema de armazenamento pode ser previsto, utilizando-se análise por parâmetros concentrados, juntamente com modelo para fluido de capacidade térmica infinita, cuja solução foi apresentada por GROBER [24].

Outra consideração importante para se assumir condições reais diz respeito a condutividade térmica do material armazenador, que pode ser analisado segundo um modelo de condutividade térmica finita ou modelo de condutividade térmica infinita, sendo a escolha de um outro, dependente da avaliação da magnitude do erro introduzido no cálculo das variáveis que participam de cada modelo, cujo estudo foi apresentado por SZEGO [5] e [25].

O problema estudado neste trabalho, envolve considerações distintas para cada condição de contorno, que serão analisadas na abordagem teórica.

1.8 FATORES INFLUENTES NA DEFINIÇÃO DO MODELO

Existem duas resistências térmicas na transferência de calor de um fluido para o interior de um material armazenador e vice-versa. Uma ocorre na superfície de contato entre sólido e líquido e é inversamente proporcional ao coeficiente de transferência de calor convectivo. A outra resistência térmica está associada a transferência de calor da superfície para o interior do material armazenador, que, por sua vez, tem duas direções perpendiculares e é inversamente proporcional a condutibilidade térmica do material armazenador. A principal transferência de calor no material armazenador é, todavia, perpendicular ao escoamento do fluido.

Se a resistência transferência de calor por convecção é muito grande, comparada a que é oferecida a transferência de calor dentro do material, surgirão desprezíveis gradientes de temperatura no material armazenador na direção normal do fluxo. Se as duas resistências são de igual grandeza ou se a resistência interna é muito maior, significativos gradientes de temperatura irão aparecer no material armazenador. O modelo matemático usado para predizer a resposta transiente de uma unidade de armazenamento segundo SCHMIDT [26] deve incluir os efeitos da

condução axial e transversal dentro do material e denomina-se modelo de condutividade finita.

A relativa influência das resistências devido a convecção e acondução, deve ser associada a magnitude do número de Biot, cuja definição está associada a geometria da unidade armazenadora. Se o número de Biot é pequeno (Biot < 0,1), conforme ARPACI [27], o gradiente de temperatura dentro do material armazenador será insignificante e um modelo unidimensional pode ser utilizado; se o número está entre 0,1 < Biot < 100, a distribuição da temperatura dentro do material armazenador dependerá das resistências interna e externa à transferência de calor; se o número de Biot for maior que 100, o problema torna-se unicamente dependente das dimensões do corpo e das propriedades físicas do material com difusividade térmica de grande magnitude.

Para se escolherem as equações que regem o comportamento dos parâmetros que estão envolvidos no escoamento de um fluido no interior de tubos, considerações importantes devem ser feitas, trazendo com elas os limites impostos na modelagem física do fenômeno que se estuda. O transporte de energia em escoamento laminar envolvendo líquido de alta viscosidade, a qual depende fortemente a temperatura, resulta em número de Prandt relativamente grande e o perfil térmico se desenvolve muito mais lentamente do que o perfil hidrodinâmico. Para que se tenha um perfil de velocidade completamente desenvolvido num escoamento laminar no interior de tubos, é necessário observar que um comprimento de entrada será importante para que se consiga este estado.

Na determinação do coeficiente de transferência de calor na parede, considerações importantes devem ser feitas, para que se possa definir o fenômeno que ocorre em termos da taxa de calor constante ou temperatura da parede constante, bem como as propriedades do fluido que são calculadas para a temperatura média da mistura segundo KAYS [28].

A medida destes fatores influentes na modelagem, definiram o modelo teórico utilizado neste estudo, o qual teve as seguintes considerações :

1. Propriedades físicas do material armazenador constantes;

2. Propriedades físicas dos fluidos transportadores de energia constantes com a temperatura;

3. Variação da temperatura do fluido na entrada;

4. Velocidade dos fluidos constantes;

5. Variação dos coeficientes de transferência de calor convectivo;

6. Perfil hidrodinamicamente desenvolvido;

7. Perfil térmico desenvolvido;

8. Distribuição inicial uniforme da temperatura no material armazenador;

9. Nenhuma transferência de calor pelas faces perpendiculares ao escoamento na unidade de armazenamento;

10. Condutividade finita.

Na definição do modelo foram ainda observados alguns detalhes evidenciados por REAY [21] :

1. O armazenamento de calor sensível utilizado na indústria está associado normalmente a produção de vapor, podendo, os evaporadores e os acumuladores operar separadamente ou em funções conjuntas.

2. Devido aos elevados aumentos no custo da energia, outros tipos de armazenamento foram tendo interesse; um deles, o de energia solar, tornou-se atrativo tanto para a indústria como para o comércio.

3. O armazenamento de calor sensível, empregado fora do pico de demanda, pode ter outros tipos de material armazenador além da água, que é a mais conhecida comercialmente. A maior vantagem da utilização da água como meio armazenador é o fato de se poder utilizar o próprio fluido, sem necessidade de um segundo meio para reutilização. Se a água (ou outro meio) não pode ser reutilizado diretamente, um trocador-armazenador deverá ser utilizado e o material armazenador poderá ser sólido.

4. Alumínio e sais fundidos podem ser utilizados como meio armazenador, mas as faixas de utilização estão limitadas pelos respectivos pontos de fusão. Ferro-fundido, aço e materiais cerâmicos são os melhores meios armazenadores sob o ponto de vista de capacidade, mas a sua temperatura máxima de armazenamento é

determinada por fatores, tais como o desempenho do sistema de isolamento e o tipo de fluido transportador de calor.

5. Materiais, como o concreto e alguns tipos de pedras, apresentam características importantes que influem na sua escolha, no que se refere ao carregamento ou a extração de calor, pois apresentam baixa difusividade térmica.

CAPÍTULO 2

CAPITULO 2

A MODELAGEM TEÓRICA

2.1 DESCRIÇÃO TEÓRICA DO FENÔMENO

A resposta transiente de uma unidade de armazenamento composta de uma seção transversal cilíndrica óca com uma capacidade térmica infinita, pode ser conseguida analiticamente.

Porem, em muitas aplicações, a resistência oferecida ao fluxo de calor pela película convectiva é da mesma ordem de grandeza, ou, menor que a resistência oferecida pelo material armazenador e sob estas condições, aparecerão os gradientes de temperatura dentro do material e o modelo usado para predizer a resposta transiente de cada unidade, deve portanto, incluir os efeitos da condução axial e transversal dentro do material.

Baseado nestas considerações, uma predição acurada da resposta transiente de armazenamento de uma unidade conforme fig.1, será obtida pelo uso do modelo de condutividade finita. O modelo para este caso dependerá da configuração geométrica do material armazenador e da distribuição da temperatura da unidade armazenadora.

No sentido de tratar o problema de uma forma bem próxima ao que pode ocorrer na prática,será introduzida uma perturbação na

temperatura de entrada do fluido quente e os resultados obtidos serão comparados com a situação em que a temperatura de entrada do fluido quente é mantida constante.

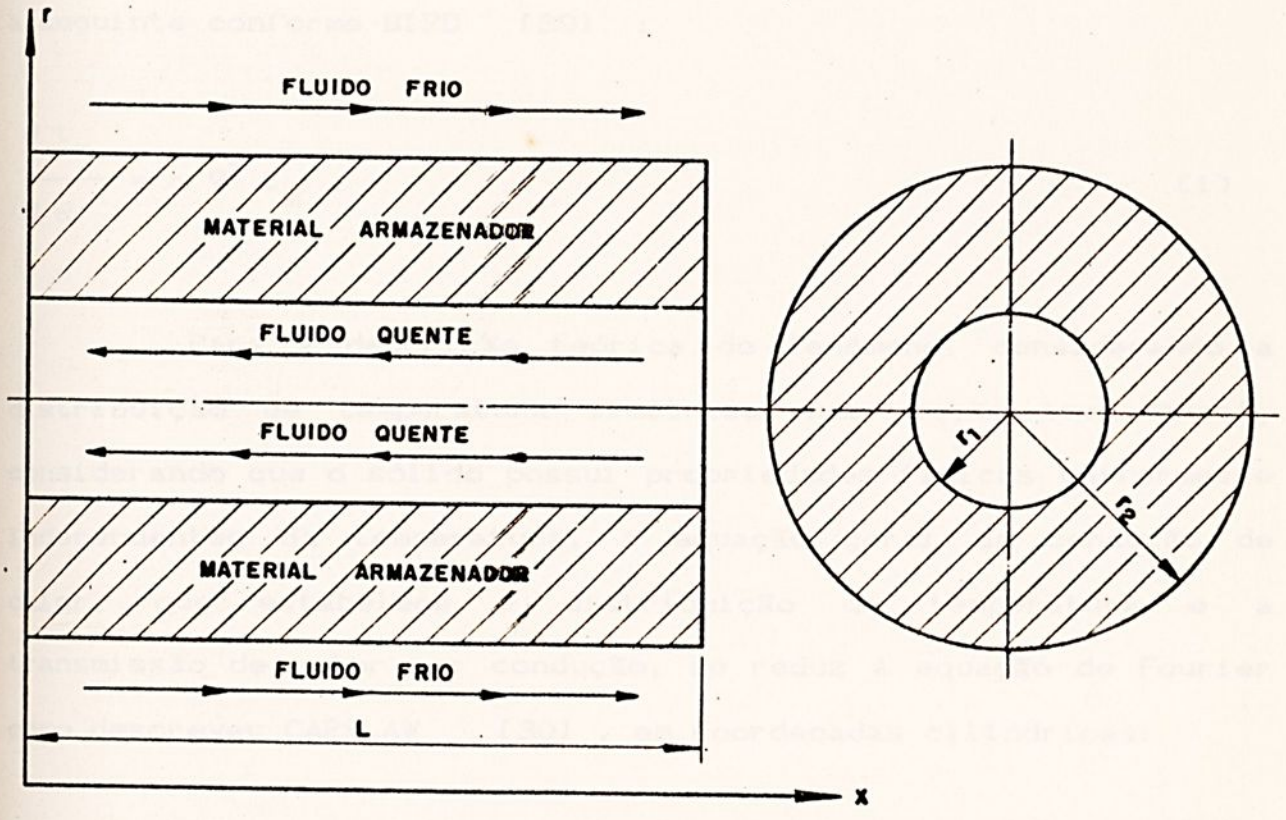


FIGURA 1 - UNIDADE ARMAZENADORA

2.2 EQUAÇÕES UTILIZADAS NA MODELAGEM

a) Para o material armazenador:

Para o material armazenador, um sólido, onde os termos de dissipação viscosa e compressibilidade são nulos; onde a massa específica é constante; onde não existe geração interna de calor, a equação da energia em função da temperatura do material é a seguinte conforme BIRD [29] :

$$\frac{\partial t_m}{\partial \theta} = \alpha \nabla^2 t_m \qquad (1)$$

Para a descrição teórica do fenômeno, considerando a distribuição de temperatura simétrica numa seção transversal; considerando que o sólido possui propriedades físicas uniformes e independentes da temperatura, a equação geral da condução de calor, que estabelece a distribuição de temperatura e a transmissão de calor por condução, se reduz à equação de Fourier como descreveu CARSLAW [30] , em coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\rho_m C_m}{K_m} \frac{\partial t_m}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 t_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_m}{\partial x^2} \qquad (2)$$

b) Para o fluido quente :

Na transmissão de calor, o valor numérico do coeficiente de película, depende da escolha da temperatura de referência do fluido. Para um fluido escoando num conduto, sua

temperatura não é uniforme numa seção e varia ao longo da direção do escoamento e da direção do fluxo de calor. Para uma determinada seção transversal do conduto, a temperatura do fluido no centro poderia ser escolhida como a temperatura de referência, mas devido as dificuldades práticas para se medir a sua magnitude, além de não representar a variação da entalpia em todo o fluido, adotaremos aqui a temperatura média da mistura, que é de uso geral, conforme KAYS [28] ,como a temperatura de referência do fluido.

O uso da temperatura média da mistura como a temperatura de referência do fluido quente e do fluido frio nos permite fazer o seguinte balanço de energia, analisando a fig.2, e considerando que a energia saindo de um volume incremental é igual: a energia entrando, menos a energia acumulada dentro deste volume, menos a energia transferida para o material armazenador, tudo no mesmo intervalo de tempo.

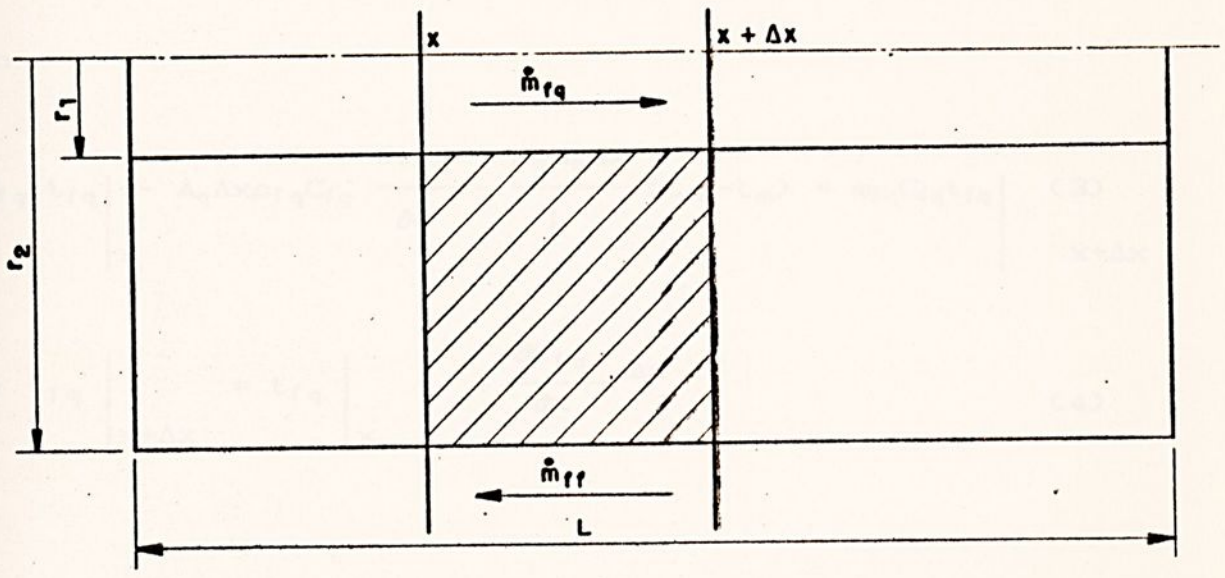


FIGURA 2 - ESQUEMA PARA O BALANÇO ENERGÉTICO

$\frac{h_q A_q \Delta_x}{L} (t_{fq} - t_m)$ ..... representa o calor transferido do fluido quente para o material armazenador no volume

$\dot{m}_{fq} \cdot C_{fq} t_{fq} \Big|_x$ ..... representa o conteúdo de energia do fluido quente entrando no volume pela seção x.

$\dot{m}_{fq} \cdot C_{fq} t_{fq} \Big|_{x+\Delta x}$ ..... representa o conteúdo de energia do fluido quente deixando o volume pela seção $x + \Delta x$

$A_q \Delta x \rho_{fq} C_{fq} \frac{\partial t_{fq}}{\partial \theta}$ ..... taxa de acumulação de energia pelo fluido quente contido dentro do volume

então:

$$\dot{m}_{fq} C_{fq} t_{fq} \Big|_x - A_q \Delta x \rho_{fq} C_{fq} \frac{\partial t_{fq}}{\partial \theta} - \frac{h_q A_q \Delta x}{L} (t_{fq} - t_m) = \dot{m}_{fq} C_{fq} t_{fq} \Big|_{x+\Delta x} \quad (3)$$

como: $$t_{fq} \Big|_{x+\Delta x} = t_{fq} \Big|_x + \frac{\partial t_{fq}}{\partial x} \Delta x \quad \therefore \quad (4)$$

$$A_q \Delta x \rho_{fq} C_{fq} \frac{\partial t_{fq}}{\partial \theta} - \frac{h_q A_q \Delta x}{L} (t_{fq} - t_m) = \dot{m}_{fq} C_{fq} \frac{\partial t_{fq}}{\partial x} \Delta x \qquad (5)$$

Como o termo Δx é comum a todos os membros da equação, podemos simplificá-lo, então:

$$\dot{m}_{fq} \cdot C_{fq} \frac{\partial t_f}{\partial x} = \frac{h_q A_q}{L} (t_m - t_{fq}) - A_q \rho_{fq} C_{fq} \frac{\partial t_{fq}}{\partial \theta} \qquad (6)$$

Se admitirmos que o fluido passa com uma velocidade elevada pelo volume considerado, cuja magnitude torna desprezível a taxa de acumulação de energia pelo fluido, podemos negligenciá-la, daí:

$$\dot{m}_{fq} C_{fq} \frac{\partial t_{fq}}{\partial x} = \frac{h_q A_q}{L} (t_m - t_{fq}) \qquad (7)$$

c) Para o Fluido Frio:

$\frac{h_f A_f \Delta x}{L} (t_m - t_{ff})$ .....representa o calor transferido do material armazenador para o fluido frio no volume.

$\dot{m}_{ff} \cdot C_{ff} t_{ff} \Big|_x$ .....representa o conteúdo de energia do fluido frio saindo no volume pela seção x

$\dot{m}_{ff} \cdot C_{ff} t_{ff} \Big|_{x+\Delta x}$ ....representa o conteúdo de energia do fluido frio entrando no volume pela seção [x+Δx]

$\Delta x \rho_{ff} C_{ff} \frac{\partial t_{ff}}{\partial \theta}$ ....taxa de acumulação de energia pelo fluido frio contido no volume.

ntão:

$$\dot{m}_f C_{ff} t_{ff}\Big|_{x+\Delta x} - A_f \Delta_x \rho_{ff} C_{ff} \frac{\partial t_{ff}}{\partial \theta} + \frac{h_f A_f \Delta x}{L}(t_m - t_{ff}) = \dot{m}_{ff} C_{ff} t_{ff}\Big|_{x} \qquad (8)$$

omo:

$$t_{ff}\Big|_{x} = t_{ff}\Big|_{x+\Delta x} + \frac{\partial t_{ff}}{\partial x}\Delta x \qquad \text{portanto} \qquad (9)$$

$$\dot{m}_f C_{ff}\frac{\partial t_{ff}}{\partial x}\Delta x = \frac{h_f A_f \Delta x}{L}(t_m - t_{ff}) - A_f \Delta x \rho_{ff} C_{ff}\frac{\partial t_{ff}}{\partial \theta} \qquad (10)$$

$$\dot{m}_f C_{ff}\frac{\partial t_{ff}}{\partial x} = \frac{h_f A_f}{L}(t_m - t_{ff}) - A_f \rho_{ff} C_{ff}\frac{\partial t_{ff}}{\partial \theta} \qquad (11)$$

Admitindo desprezível a taxa de acumulação de energia elo fluido frio vem:

$$\dot{m}_f C_{ff}\frac{\partial t_{ff}}{\partial x} = \frac{h_f A_f}{L}(t_m - t_{ff}) \qquad (12)$$

Condições Iniciais e de Contorno para a situação onde a emperatura de entrada do fluido quente é mantida constante.

) Para o FLUIDO QUENTE:

para as equações 2 e 7 temos:

C.I $\theta = 0$

$t_{fq} = t_m = t_o$ (13)a

C.C $\theta > 0, \quad r_1 < r < r_2$

$x = 0 \quad t_{fq} = t_{fq_i} \qquad \frac{\partial t_m}{\partial x} = 0$ (14)a

$x = L \qquad \frac{\partial t_m}{\partial x} = 0$

$\theta > 0, \quad r = r_1$

$$h_q (t_m - t_{fq}) = Km \frac{\partial t_m}{\partial r} \qquad (15)$$

$\theta > 0, \quad r = r_2$ (16)

$$h_f (t_{ff} - t_m) = Km \frac{\partial t_m}{\partial r}$$

b) Para o FLUIDO FRIO

Para as equações 2 e 12 temos:

I $\theta = 0$ (17)

$t_{ff} = t_m = t_o$

C $\theta > 0, \quad r_1 < r < r_2$

$x = L \quad t_{ff} = t_{ffi} \qquad \frac{\partial t_m}{\partial x} = 0$ (18)

$x = 0 \qquad \frac{\partial t_m}{\partial x} = 0$

$\theta > 0 \qquad r = r_1$

$$h_q (t_m - t_{fq}) = K_m \frac{\partial t_m}{\partial r} \qquad (15)$$

$\theta > 0 \qquad r = r_2$

$$h_f (t_{ff} - t_m) = K_m \frac{\partial t_m}{\partial r} \qquad (16)$$

Condições Iniciais e de Contorno para a situação onde a temperatura de entrada do fluido quente varia com o tempo:

a) Para o FLUIDO QUENTE:

Para as equações 2 e 7 temos:

C.I $\theta = 0$

$t_{fq}=t_m=t_o$ (13)b

C.C $\theta > 0$ $r_1 < r < r_2$

$x = 0$ $t_{fq}=t_{fqi}=f(t)$ $\frac{\partial t_m}{\partial x} = 0$

(14)b

$x = L$ $\frac{\partial t_m}{\partial x} = 0$

$\theta > 0$ $r=r_1$

$h_q (t_m-t_{fq}) = K_m \frac{\partial t_m}{\partial r}$ (15)

$\theta > 0$ $r=r_2$

$h_f (t_{ff}-t_m) = K_m \frac{\partial t_m}{\partial r}$ (16)

b) Para o FLUIDO FRIO:

C.I $\theta = 0$ (17)

$t_{ff}=t_m=t_o$

C.C $\theta > 0, \quad r_1 < r < r_2$ (18)

$x = L \quad t_{ff} = t_{ffi} \quad \frac{\partial t_m}{\partial x} = 0$

$\theta > 0 \quad r = r_1$ (15)

ou

$$h_q (t_m - t_{fq}) = K_m \frac{\partial t_m}{\partial r}$$

$\theta > 0 \quad r = r_2$ (16)

$$h_f (t_{ff} - t_m) = K_m \frac{\partial t_m}{\partial r}$$

ADIMENSIONALIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES

a) Para o FLUIDO QUENTE

$$A_q = 2 \pi r_1 L \quad (19)$$

substituindo (19) em (7) vem

$$\dot{m}_{fq} \cdot C_{fq} \frac{\partial t_{fq}}{\partial x} = \frac{2\pi r_1 L h_q}{L} (t_m - t_{fq}) \quad (20)$$

ou

$$\frac{\partial t_{fq}}{\partial x} = \frac{2\pi r_1 h_q}{\dot{m}_{fq} C_{fq}} (t_m - t_{fq}) \quad (21)$$

Fazendo

$$T_{fq} = \frac{t_{fq} - t_{ffi}}{t_{fqi} - t_{ffi}} \qquad (22)$$

$$T_m = \frac{t_m - t_{ffi}}{t_{fqi} - t_{ffi}} \qquad (23)$$

de (22) vem:

$$t_{fq} = T_{fq} (t_{fqi} - t_{ffi}) + t_{ffi} \qquad (24)$$

portanto ,

$$\frac{\partial t_{fq}}{\partial T_{fq}} = t_{fqi} - t_{ffi} \qquad (25)$$

ou

$$\partial t_{fq} = (t_{fqi} - t_{ffi}) . \partial T_{fq} \qquad (25)$$

da equação (21) vem:

$$\partial t_{fq} = \frac{2\pi r_1 h_q}{\dot{m}_{fq} C_{fq}} (t_m - t_{fq}) \partial x \qquad (26)$$

fazendo:

$$\xi_q = \frac{2\pi r_1 h_q}{\dot{m}_{fq} C_{fq}} x \qquad (27)$$

$$\partial \xi_q = \frac{2\pi r_1 h_q}{\dot{m}_{fq} C_{fq}} \partial x \qquad (28)$$

de(23) temos :

$$t_m = T_m (t_{fqi} - t_{ffi}) + t_{ffi} \qquad (29)$$

substituindo (25) em (26)

$$(t_{fqi} - t_{ffi}) \partial T_{fq} = \frac{2\pi r_1 h_q}{\dot{m}_{fq} C_{fq}} (t_m - t_{fq}) \partial x \qquad (30)$$

substituindo (24) e (29) em (30) vem :

$$(t_{fqi} - t_{ffi})\partial T_{fq} = \frac{2\pi r_1 h_q}{\dot{m}_{fq} C_{fq}}\left[T_m(t_{fqi}-t_{ffi})+t_{ffi}-T_{fq}(t_{fqi}-t_{ffi})-t_{ffi}\right]\partial x \quad (31)$$

ou

$$(t_{fqi}-t_{ffi})\partial T_{fq} = (t_{fqi}-t_{ffi})(T_m-T_{fq})\frac{2\pi r_1 h_q}{\dot{m}_{fq} C_{fq}}\ \partial x \quad (32)$$

substituindo (28) em (32) resulta na equação adimensional

$$\frac{\partial T_{fq}}{\partial \xi_q} = T_m - T_{fq} \quad (33)$$

b) Para o FLUIDO FRIO

$$A_f = 2\pi r_2 L \quad (34)$$

substituindo (34) em (12) vem:

$$\dot{m}_{ff} C_{ff} \frac{\partial t_{ff}}{\partial x} = \frac{2\pi r_2 h_f L}{L}(t_m - t_{ff}) \quad (35)$$

ou

$$\frac{\partial t_{ff}}{\partial x} = \frac{2\pi r_2 h_f}{\dot{m}_{ff} C_{ff}}(t_m - t_{ff}) \quad (36)$$

Fazendo:

$$T_{ff} = \frac{t_{ff} - t_{ffi}}{t_{fqi} - t_{ffi}} \quad (37)$$

$$T_m = \frac{t_m - t_{ffi}}{t_{fqi} - t_{ffi}} \qquad (23)$$

de (37) vem:

$$t_{ff} = T_{ff}(t_{fqi} - t_{ffi}) + t_{ffi} \qquad (38)$$

portanto

$$\frac{\partial t_{ff}}{\partial T_{ff}} = t_{fqi} - t_{ffi} \qquad (39)$$

ou

$$\partial t_{ff} = (t_{fqi} - t_{ffi}) \partial T_{ff} \qquad (39)$$

da equação (36) vem :

$$\partial t_{ff} = \frac{2\pi r_2 h_f}{\dot{m}_{ff} C_{ff}} (t_m - t_{ff}) \partial x \qquad (40)$$

fazendo:

$$\xi_f = \frac{2\pi r_2 h_f}{\dot{m}_{ff} C_{ff}} x \qquad (41)$$

$$\partial \xi_f = \frac{2\pi r_2 h_f}{\dot{m}_{ff} C_{ff}} \partial x \qquad (42)$$

da equação (23) vem :

$$t_m = T_m (t_{fqi} - t_{ffi}) + t_{ffi} \qquad (29)$$

substituindo (39) em (40)

$$(t_{fqi} - t_{ffi}) \partial T_{ff} = \frac{2\pi r_2 h_f}{\dot{m}_{ff} C_{ff}} (t_m - t_{ff}) \partial x \qquad (43)$$

substituindo (38) e (29) em (43)

$$(t_{fqi}-t_{ffi})\partial T_{ff}=\frac{2\pi r_2\ h_f}{\dot{m}_{ff}\ C_{ff}}\left[T_m(t_{fqi}-t_{ffi})+t_{ffi}-T_{ff}(t_{fqi}-t_{ffi})-t_{ffi}\right]\partial x \quad (44)$$

ou

$$(t_{fqi}-t_{ffi})\partial T_{ff}=(t_{fqi}-t_{ffi})(T_m-T_{ff})\frac{2\pi r_2\ h_f}{\dot{m}_{ff}\ C_{ff}}\partial x \quad (45)$$

substituindo (42) em (45) resulta na equação adimensional

$$\frac{\partial T_{ff}}{\partial \xi_f}=T_m-T_{ff} \quad (46)$$

c) Para o MATERIAL ARMAZENADOR

A relação adimensional utilizada para o raio do tubo é :

$$R=\frac{r}{r_2-r_1} \quad ;\text{para } r_2>r_1 \quad (47)$$

portanto:

$$\begin{aligned} r &= R(r_2-r_1) \\ \partial r &= \partial R\,(r_2-r_1) \\ \partial r^2 &= \partial R^2(r_2-r_1)^2 \end{aligned} \quad (48)$$

de (29) vem:

$$\begin{aligned} t_m &= T_m(t_{fqi}-t_{ffi})+t_{ffi} \\ \partial t_m &= \partial T_m(t_{fqi}-t_{ffi}) \\ \partial^2 t_m &= \partial^2 T_m(t_{fqi}-t_{ffi}) \end{aligned} \quad (49)$$

substituindo (27) , (48) e (49) em (2)

$$\frac{\rho_m\, C_m}{K_m}\,\frac{\partial}{\partial\theta}\left[T_m(t_{fqi}-t_{ffi})+t_{ffi}\right]=\frac{\partial^2 T_m(t_{fqi}-t_{ffi})}{\partial R^2\,(r_2-r_1)^2}+\frac{1}{R(r_2-r_1)}\,\frac{\partial T_m(t_{fqi}-t_{ffi})}{\partial R(r_2-r_1)}$$

$$+\frac{\partial^2 T_m\,(t_{fqi}-t_{ffi})}{\partial\left[\dfrac{\dot m_{fq}\,C_{fq}\,\xi_q}{2\pi r_1\,h_q}\right]^2} \qquad (50)$$

ou

$$\frac{\rho_m\, C_m}{K_m}\,(t_{fqi}-t_{ffi})\,\frac{\partial T_m}{\partial\theta}=\frac{(t_{fqi}-t_{ffi})}{(r_2-r_1)^2}\,\frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2}+\frac{(t_{fqi}-t_{ffi})}{R(r_2-r_1)^2}\,\frac{\partial T_m}{\partial R}+$$

$$+(t_{fqi}-t_{ffi})\left[\frac{2\pi r_1\,h_q}{\dot m_{fq}\,C_{fq}}\right]^2 \qquad (51)$$

ou

$$\frac{\rho_m\, C_m}{K_m}\,\frac{\partial T_m}{\partial\theta}=\frac{1}{(r_2-r_1)^2}\,\frac{\partial T_m}{\partial R^2}+\frac{1}{R(r_2-r_1)^2}\,\frac{\partial T_m}{\partial R}+\left[\frac{2\pi r_1 h_q}{\dot m_{fq}\,C_{fq}}\right]\frac{\partial^2 T_m}{\partial\xi_q{}^2} \qquad (52)$$

A razão adimensional para os raios é :

$$U=\frac{r_1}{r_2} \qquad (53)$$

reagrupando a equação (52)

$$\frac{\rho_m C_m}{K_m}\frac{\partial T_m}{\partial \theta} = \frac{1}{(r_2-r_1)(r_2-r_1)}\frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{1}{R(r_2-r_1)(r_2-r_1)}\frac{\partial T_m}{\partial R} +$$

$$+\left[\frac{2\pi r_1 h_q}{\dot{m}_{fq} C_{fq}}\right]\frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi_q^2} \qquad (54)$$

ou

$$\frac{\partial T_m}{\partial \theta} = \frac{K_m}{\rho_m C_m (r_2-r_1)(r_2-r_1)}\frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{K_m}{R(r_2-r_1)(r_2-r_1)}\frac{\partial T_m}{\partial R} +$$

$$+ \frac{K_m}{\rho_m C_m}\left[\frac{2\pi r_1 h_q}{\dot{m}_{fq} C_{fq}}\right]\frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi_q^2} \qquad (55)$$

Analisando o termo $\frac{2\pi r_1 h_q}{\dot{m}_{fq} C_{fq}}$ temos que:

$$\frac{r_1 h_q}{\dot{m}_{fq} C_{fq}} = \frac{L.M.\theta^{-3}.T^{-1}}{m\theta^{-1}.L^2.\theta^{-2}.T^{-1}} = \frac{1}{L} \qquad (56)$$

A razão entre os comprimentos incrementais x e o comprimento total do armazenador L, da equação (27), será:

$$\frac{X}{L} = \frac{\xi_q}{\lambda_q} \qquad (57)$$

onde

$$\lambda_q = \frac{2\pi r_1 h_q}{\dot{m}_{fq} \cdot C_{fq}} \cdot L \qquad (58)$$

A razão entre a resistência do fluxo de calor externo e a resistência do fluxo de calor interno, que é a resistência relativa adimensional, o número de Biot, será para a configuração do modelo:

-Fluido Quente

$$B_{iq} = \frac{h_q (r_2 - r_1)}{K_m} \qquad (59)$$

-Fluido Fluido Frio

$$B_{if} = \frac{h_f (r_2 - r_1)}{K_m} \qquad (60)$$

Substituindo (58) em (55), e dividindo membro a membro por h_q e reagrupando teremos:

$$\frac{\rho_m C_m}{h_q} \frac{\partial T_m}{\partial \theta} = \frac{K_m}{h_q (r_2 - r_1)(r_2 - r_1)} \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{K_m}{h (r_2 - r_1) R (r_2 - r_1)} \frac{\partial}{\partial R} +$$

$$+ \frac{\partial T_m}{L^2 h_q} \frac{K_m \lambda^2_q}{\partial \xi^2_q} \frac{\partial^2 T_m}{} \qquad (61)$$

Multiplicando por $(r_2^2 - r_1^2)$ a equação

$$\frac{\rho_m C_m (r_2^2 - r_1^2)}{h_q} \frac{\partial T_m}{\partial \theta} = \frac{K_m}{h_q (r_2 - r_1)} (r_2 + r_1) \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{K_m (r_2 + r_1)}{h_q (r_2 - r_1) R} \frac{\partial T_m}{\partial R} +$$

$$+ \frac{K_m}{h_q L^2} \lambda^2_q (r_2^2 - r_1^2) \frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2_q} \qquad (62)$$

substituindo (59) em (62) vem:

$$\frac{\rho_m C_m}{h_q} (r_2^2 - r_1^2) \frac{\partial T_m}{\partial \theta} = \frac{(r_2 + r_1)}{B_{iq}} \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{(r_2 + r_1)}{B_{iq}} \frac{1}{R} \frac{\partial T_m}{\partial R} +$$

$$+ \frac{\lambda_q^2}{L^2} \frac{(r_2 - r_1)^2}{B_{iq}} (r_2 + r_1) \frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi_q^2} \qquad (63)$$

A razão entre a diferença dos raios e o comprimento do armazenador será:

$$X = \frac{(r_2 - r_1)}{L} \qquad (64)$$

A razão $\frac{(\lambda_q X)^2}{B_i}$ é adimensional ∴

$$C = \frac{(\lambda_q X)^2}{B_{iq}} \qquad (65)$$

Substituindo (53) e (65) em (63) e dividindo membro a membro por r_2, vem:

$$\frac{\rho_m C_m}{h_q}(r_2 - r_1)(1+U)\frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{(1+U)}{Bi_q} + \frac{1}{R}\frac{\partial T_m}{\partial R} + C(1+U)\frac{\partial T_m}{\partial \xi_q^2} \qquad (66)$$

Analisando o termo $\frac{\partial_m C_m}{h_q}(r_2 - r_1)$, temos

$$\frac{\rho_m C_m}{h_q}(r_2 - r_1) = \frac{ML^{-3}L^2\theta^{-2}T^{-1}L}{M\theta^{-3}T^{-1}} = \frac{1}{\theta} \qquad (67)$$

Para a área de troca de calor com o fluido quente da equação (19) e para o volume do material armazenador, podemos escrever:

$$\eta_q = \frac{2\pi r_1 L h_q \theta}{\pi(r_2^2 - r_1^2)L\rho_m C_m} = \frac{2h_q\theta r_1}{(r_2 - r_1)(r_2 + r_1)\rho_m C_m} = \frac{2h\theta U}{(r_2 - r_1)(\rho_m C_m)} \qquad (68)$$

Analisando o termo η:

$$\frac{h\theta U}{(r_2 - r_1)(1+U)\rho_m C_m} = \frac{M\theta^{-3}T^{-1}\theta}{LML^{-3}L^{-2}\theta^{-2}T^{-1}} = 1 \quad \therefore \text{ adimensional} \qquad (69)$$

Dividindo membro a membro da equação (66) por 2U, vem:

$$\frac{\rho_m C_m (r_2 - r_1)(1+U)}{2Uh_q}\frac{\partial T_m}{\partial \theta} = \frac{(1+U)}{2UBi_q}\frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{(1+U)}{2UBi_q}\frac{1}{R}\frac{\partial T_m}{\partial R} + \frac{C(1+U)}{2U}\frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi_q^2} \qquad (70)$$

De (68) podemos escrever :

$$\theta = \frac{(r_2 - r_1)\,(1+U)\,\rho_m C_m}{2Uh_q}\,\eta_q \qquad (71)$$

$$\therefore \frac{\partial T_m}{\partial \theta} = \frac{\partial T_m}{\left[\dfrac{(r_2-r_1)(1+U)\,T_m C_m}{2Uh_q}\,\eta_q\right]} \qquad (72)$$

ou

$$\frac{\partial T_m}{\partial \theta} = \frac{2Uh_q}{(r_2-r_1)\,(1+U)\rho_m C_m}\;\frac{\partial T_m}{\partial \eta_q} \qquad (73)$$

Substituindo (73) em (70) e reagrupando temos:

$$\frac{\partial T_m}{\partial \eta_q} = \frac{(1+U)}{2UB_{iq}}\left[\frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{1}{R}\,\frac{\partial T_m}{\partial R}\right] + \frac{C\,(1+U)}{2U}\;\frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi_q^{\,2}} \qquad (74)$$

As Condições Iniciais e Contorno passam a ser as seguintes:

a) Temperatura de entrada do fluido quente constante com o tempo

C.I. para $\eta_q = 0$ (75)a

$T_m = 0$

$T_{fqi} = 1$

$T_{ff} = 0$

C.C. para $\eta_q > 0$; $\frac{U}{1-U} < R < \frac{1}{1-U}$

$$\xi_q = 0 \qquad T_{fq} = 1 \qquad \frac{\partial T_m}{\partial \xi_q} = 0$$

$$\xi_q = \lambda_q \qquad T_{ff} = 0 \qquad \frac{\partial T_m}{\partial \xi_q} = 0$$

(76)a

para $\eta_q > 0$; $R = \frac{U}{1-U}$

$$\frac{\partial T_m}{\partial R} = B_{iq} (T_m - T_{fq})$$

para $\eta_q > 0$; $R = \frac{1}{1-U}$

$$\frac{\partial T_m}{\partial R} = B_{iq} (T_{ff} - T_m)$$

(78)

b) Temperatura de entrada do fluido quente variável com o tempo

C.I. para $\eta_q = 0$

$$T_m = 0$$
$$T_{fq} = 1$$
$$T_{ff} = 0$$

(75)b

C.C para $\eta_q > 0$; $\frac{U}{1-U} < R < \frac{1}{1-U}$

$\xi_q = 0$ $T_{fq} = 1 + a \operatorname{sen}(wt)$ $\frac{\partial T_m}{\partial \xi_q} = 0$

$\xi_q = \lambda_q$ $T_{ff} = 0$ $\frac{\partial T_m}{\partial \xi_q} = 0$ (76)b

CAPÍTULO 3

CAPITULO 3

O MÉTODO NUMÉRICO E COMPUTACIONAL

3.1 ESTABELECIMENTO DO RETICULADO

Para representar a seção longitudinal na equação discretizada, usaremos uma matriz T (i,j), onde i representa x e j representa r, de forma que o ponto (i,j) da matriz, corresponderá ao par ordenado (x,r) na seção longitudinal do cilindro, num dado instante θ, segundo a função de mapeamento.

$$x = (i - 1)\Delta x \qquad (79)$$

$$r = (j - 1)\Delta r \qquad (80)$$

Para

NR → número de pontos ao longo do raio

NX → número de pontos ao longo do comprimento

Os espaçamentos entre os pontos nos eixos r e x, são obtidos por :

$$\Delta x = \frac{L}{(NX - 1)} \qquad (81)$$

$$\Delta r = \frac{r_2}{(NR - 1)} \qquad (82)$$

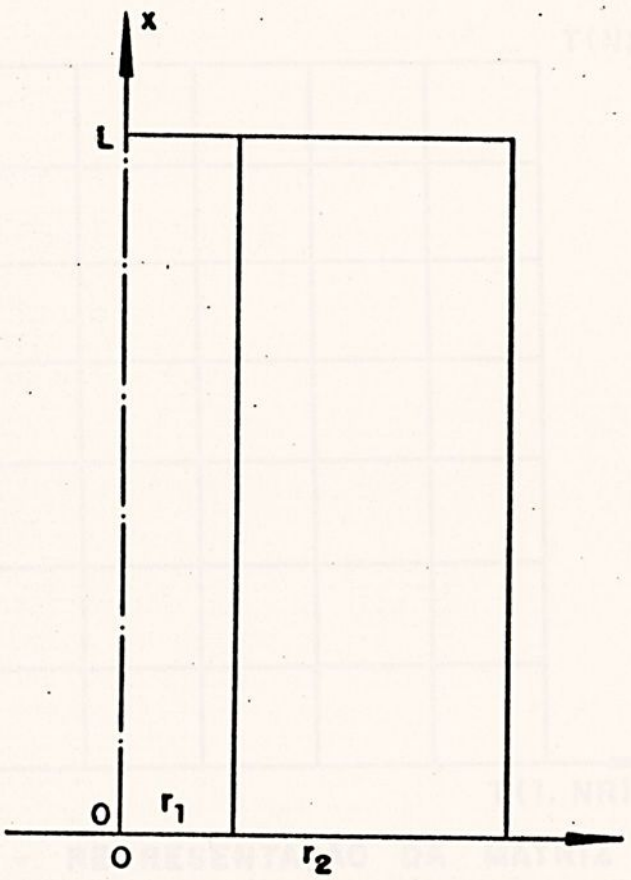


FIGURA 3 - SEÇÃO LONGITUDINAL NO SISTEMA DE COORDENADAS CILÍNDRICAS

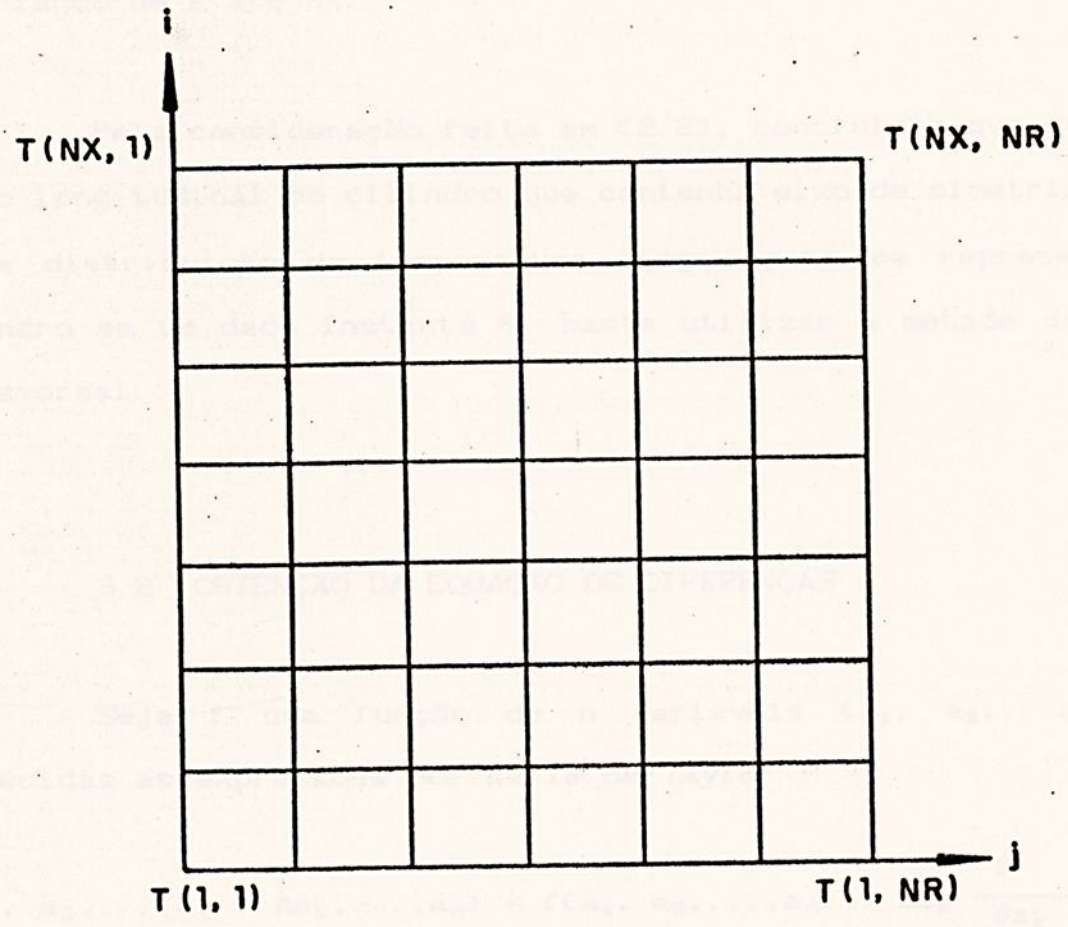


FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DA MATRIZ T(i, j)

A matriz T (i,j) tem seus eixos conforme a figura 4 e a variação do termo (i), corresponde a varrer as colunas ao longo do comprimento do cilíndro, enquanto a variação do termo (j) corresponde a varrer as linhas, ou seja, ao longo do raio.

O eixo de simetria é representado pela coluna T (i,1) com i variando de 1 até NX.

Pela consideração feita em (2.2), concluimos que qualquer seção longitudinal do cilindro que contenha eixo de simetria tem a mesma distribuição de temperatura. Logo, para se representar o cilindro em um dado instante θ, basta utilizar a metade da seção transversal.

3.2 OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO DE DIFERENÇAS

Seja f uma função de n variáveis $(a_1, a_2, \ldots a_n)$ são conhecidas as expressões por série de Taylor :

$$f(a_1, a_2, \ldots, a_k + \Delta a_k, \ldots, a_n) = f(a_1, a_2, \ldots, a_n) + \Delta a_k \frac{\partial f}{\partial a_k} + \frac{(\Delta a_k)^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial a_k^2} \cdots\cdots \quad (83)$$

$$f(a_1, a_2, \ldots, a_k - \Delta a_k, \ldots, a_n) = f(a_1, a_2, \ldots, a_n) - \Delta a_k \frac{\partial f}{\partial a_k} + \frac{(\Delta a_k)^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial a_k^2} \cdots\cdots \quad (84)$$

Truncando as equações (83) e (84) após a derivada de primeira ordem, temos duas expressões para $\frac{\partial f}{\partial a_k}$, conforme CARNAHAN [31]

$$\left.\frac{\partial f}{\partial a_k}\right|_{(a_1,\ldots,a_n)} = \frac{f(a_1,\ldots,a_k+\Delta a_k,\ldots,a_n) - f(a_1,\ldots,a_n)}{\Delta a_k} \quad (85)$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial a_k}\right|_{(a_1,\ldots,a_n)} = \frac{f(a_1,\ldots,a_n) - f(a_1,\ldots,a_k-\Delta a_k,\ldots,a_k)}{\Delta a_k} \quad (86)$$

Somando (83)e (84),obtemos uma expressão para $\frac{\partial^2 f}{\partial a_k^2}$ conforme CARNAHAN [31]

$$\left.\frac{\partial^2 f}{\partial a^2_k}\right|_{(a_1,\ldots,a_n)} = \frac{f(a_1,\ldots,a_k+\Delta a_k\ldots,a_n)-2f(a_1,\ldots,a_n)}{(\Delta a_k)^2} + \frac{f(a_1,\ldots,a_k-\Delta a_k,\ldots a_n)}{(\Delta a_k)^2} \quad (87)$$

Subtraindo (84)de(83) obtemos outra expressão para $\frac{\partial f}{\partial a_k}$ conforme CARNAHAN [31]

$$\left.\frac{\partial f}{\partial a_k}\right|_{(a_1,\ldots,a_n)} = \frac{f(a_1,\ldots,a_k+\Delta a_k,\ldots,a_n)-f(a_1,\ldots,a_k-\Delta a_k,\ldots a_n)}{2\,\Delta a_k} \quad (88)$$

De (88), obtemos a expressão da aproximação centrada para $\frac{\partial T_m}{\partial R}$:

$$\left.\frac{\partial T_m}{\partial R}\right|_{\xi,R} = \frac{T_m(\xi,\ R+\Delta R) - T_m(\xi,\ R-\Delta R)}{2\ \Delta R} \qquad (89)$$

De (86), obtemos a expressão da aproximação descendente para $\frac{\partial T_m}{\partial R}$:

$$\left.\frac{\partial T_m}{\partial R}\right|_{\xi,R} = \frac{T_m(\xi,R) - T_m(\xi,R - \Delta R)}{\Delta R} \qquad (90)$$

.

De (85), obtemos a expressão da aproximação ascendente para $\frac{\partial T_m}{\partial R}$:

$$\left.\frac{\partial T_m}{\partial R}\right|_{\xi,R} = \frac{T_m(\xi,R + \Delta R) - T_m(\xi,R)}{\Delta R} \qquad (91)$$

De (87), obtemos as expressões das equações das aproximações para $\frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2}$ para os três casos :

a) Centrada :

$$\left.\frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2}\right|_{\xi,R} = \frac{T_m(\xi,R+\Delta R) - 2\ T_m(\xi,R) + T_m(\xi,R-\Delta R)}{(\Delta R)^2} \qquad (92)$$

b) Descendente :

$$\left.\frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2}\right|_{\xi,R} = \frac{T_m(\xi,R) - 2\ T_m(\xi,R-\Delta R) + T_m(\xi,R-2\Delta R)}{(\Delta R)^2} \qquad (93)$$

c) Ascendente :

$$\left.\frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2}\right|_{\xi,R} = \frac{T_m(\xi,R+2R) - 2\,T_m(\xi,R+\Delta R) + T_m(\xi,R)}{(\Delta R)^2} \qquad (94)$$

De (87), obtemos as expressões das equações das aproximações para $\frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2}$, para os três casos :

a) Centrada :

$$\left.\frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2}\right|_{\xi,R} = \frac{T_m(\xi+\Delta\xi,R) - 2\,T_m(\xi,R) + T_m(\xi-\Delta\xi,R)}{(\Delta\xi)^2} \qquad (95)$$

b) Descendente :

$$\left.\frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2}\right|_{\xi,R} = \frac{T_m(\xi,R) - 2\,T_m(\xi-\Delta\xi,R) + T_m(\xi-2\Delta\xi,R)}{(\Delta\xi)^2} \qquad (96)$$

c) Ascendente :

$$\left.\frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2}\right|_{\xi,R} = \frac{T_m(\xi+2\Delta\xi,R) - 2\,T_m(\xi+\Delta\xi,R) + T_m(\xi,R)}{(\Delta\xi)^2} \qquad (97)$$

De (85), obtemos a expressão da aproximação para $\frac{\partial T_m}{\partial \eta}$:

$$\frac{\partial T_m}{\partial \eta} = T_m(\xi,R)\Big|_{\eta+\Delta\eta} - T_m(\xi,R)\Big|_{\eta} \qquad (98)$$

De (85), obtemos a expressão da aproximação para $\frac{\partial T_f}{\partial \xi}$:

- Para o FLUIDO QUENTE:

$$\left.\frac{\partial T_{fq}}{\partial \xi_q}\right|_{\xi_q} = \frac{T_{fq}(\xi_q + \Delta\xi_q) - T_{fq}(\xi_q)}{\Delta\xi_q} \qquad (99)a$$

- Para o FLUIDO FRIO:

$$\left.\frac{\partial T_{ff}}{\partial \xi_f}\right|_{\xi_f} = \frac{T_{ff}(\xi_f + \Delta\xi_f) - T_{ff}(\xi_f)}{\Delta\xi_f} \qquad (99)b$$

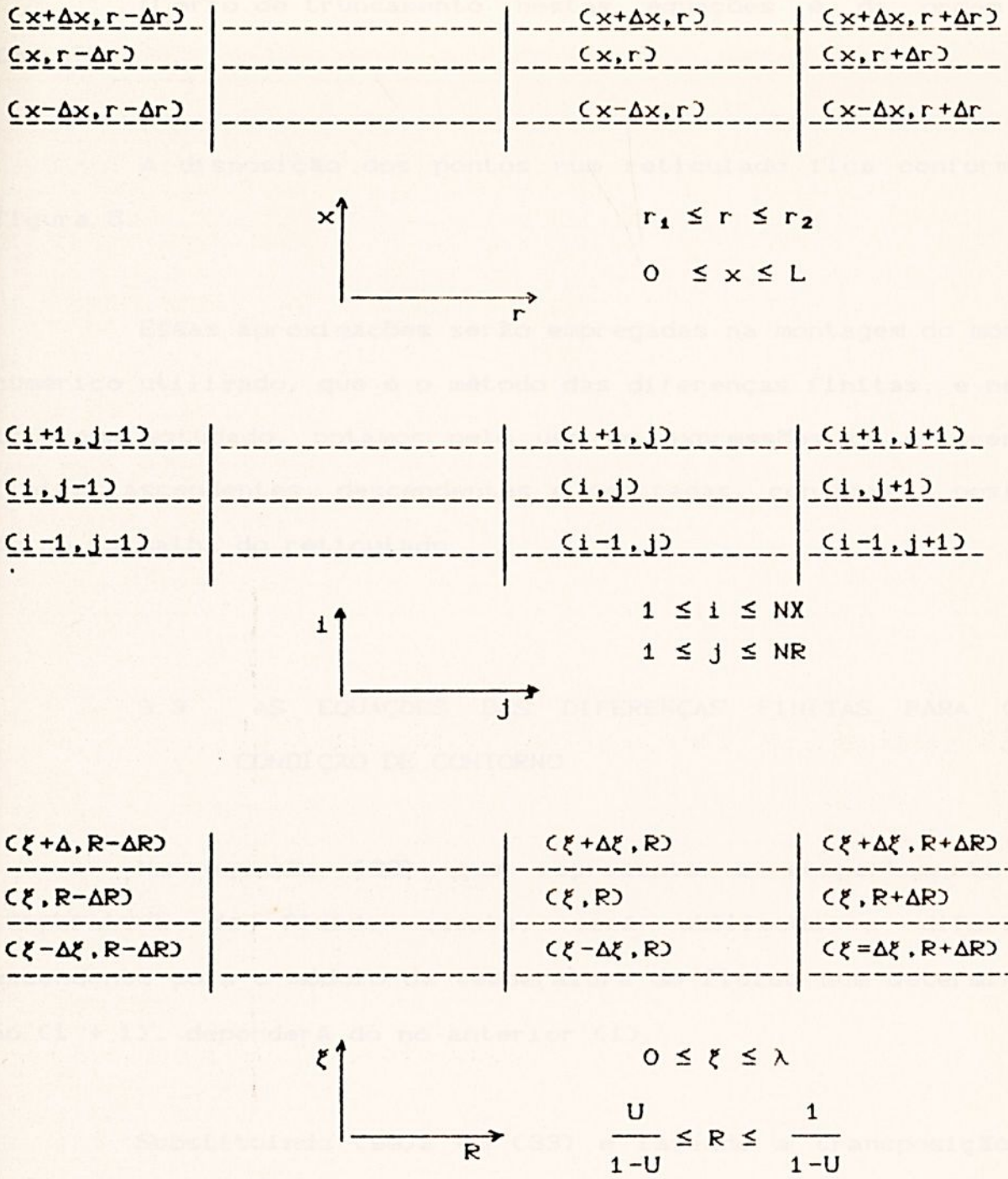


FIGURA 5. MALHA REPRESENTATIVA DA POSIÇÃO DOS NÓS

O erro de truncamento nestas equações é da ordem de $(\Delta a_k)^2$.

A disposição dos pontos num reticulado fica conforme a figura 5.

Essas aproximações serão empregadas na montagem do modelo numérico utilizado, que é o método das diferenças finitas, e neste problema estudado, optamos pelo uso de expressões de diferenças finitas ascendentes, descendentes e centradas, conforme a posição do nó na malha do reticulado.

3.3 AS EQUAÇÕES DAS DIFERENÇAS FINITAS PARA CADA CONDIÇÃO DE CONTORNO

Na equação (33) que representa o comportamento da temperatura do fluido quente, será utilizada a diferença ascendente pois o módulo da temperatura do fluido num determinado nó (i + 1), dependerá do nó anterior (i).

Substituindo (99)a em (33) e fazendo a transposição de índices conforme a figura 5, temos :

$$T_{fq}(i+1) = \Delta\xi_q \left[T_m(i,j) - T_{fq}(i) \right] + T_{fq}(i) \qquad (100)$$

A determinação da temperatura no material armazenador será feito em três situações, satisfazendo as condições de

contorno estabelecidas em (76),(77) e (78).

Na superfície interna do material armazenador, onde o escoamento do fluido ocorre, teremos diferenças ascendentes, pois na situação real, a temperatura do material armazenador num nó (i+1) ou (j+1) dependerá dos nós (i) ou (j) respectivamente.

Substituindo (68), (77), (81), (82), (94), (97) e (98) em (74), temos :

$$T_m(i,j)\Big|_{\theta+1} = T_m(i,j)\Big|_{\theta} + \Delta\theta \left\{ A \left[T_m(i,j)\Big|_{\theta} - 2T_m(i+1,j)\Big|_{\theta} + T_m(i+2,j)\Big|_{\theta} \right] + B\left[T_m(i,j+2)\Big|_{\theta} - 2T_m(i,j+1)\Big|_{\theta} + T_m(i,j)\Big|_{\theta} \right] + C^* \left[T_f(i)\Big|_{\theta} - T_m(i,j)\Big|_{\theta} \right] \right\} \quad (101)$$

onde :

$$A = \alpha \left(\frac{NX - 1}{L} \right) \quad (102)$$

$$B = \alpha \left(\frac{NR - 1}{r_2 - r_1} \right)^2 \quad (103)$$

$$C^* = \frac{h\,(1 - U)}{(r_2 - r_1)\rho_m\, C_m\, U} \quad (104)$$

Para a determinação da distribuição de temperatura do

material armazenador, iremos adotar um comportamento da temperatura de forma que satisfaça a condição de isolamento nas faces do cilindro, conforme condições de contorno já adotadas. Para tal, adotaremos diferenças centrada na direção do raio e ascendente na direção do escoamento.

Substituindo (47), (68), (76), (81), (82), (89), (92), (97) e (98) em (74), temos:

$$T_m(i,j)\Big|_{\theta+1} = T_m(i,j)\Big|_{\theta} + \Delta\theta \left(A \left[T_m(i,j)\Big|_{\theta} - 2\,T_m(i+1,j)\Big|_{\theta} + T_m(i+2,j)\Big|_{\theta} \right] + B \left[T_m(i,j+1)\Big|_{\theta} - 2\,T_m(i,j)\Big|_{\theta} + T_m(i,j-1)\Big|_{\theta} \right] + D \left[T_m(i,j+1)\Big|_{\theta} - T_m(i,j-1)\Big|_{\theta} \right] \right) \quad (105)$$

onde :

$$D = \alpha \left(\frac{(NR-1)^2}{2(r_2-r_1)\left[r_1(NR-1) + (r_2-r_1)(j-1) \right]} \right) \quad (106)$$

Para a superfície externa do material armazenador, onde está escoando o fluido frio, utilizaremos diferenças ascendentes, pois na situação real, a temperatura do material

armazenador num nó (i) ou (j) dependerá dos nós (i-1) ou (j-1) respectivamente.

Substituindo (99)b em (33) e fazendo a transposição de índices conforme a figura 5, temos:

$$T_{ff}(i-1) = \Delta\xi_f \left[T_m(i,j) - T_{ff}(i) \right] + T_{ff}(i) \qquad (107)$$

3.4 VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ERROS E ESTABILIDADE DO MÉTODO EXPLICITO UTILIZADO

a) Erros Introduzidos

Na solução numérica de equações diferenciais, as derivadas são substituidas por expressões de diferenças finitas à cada nó, e a solução da equação diferencial é reduzida à resolução de um conjunto de equações algébricas. No entanto, um erro é introduzido à cada etapa de cálculo devido às aproximações envolvidas nas diferenças e no cálculo numérico. O efeito acumulativo destes erros na solução final e a estabilidade da equação diferencial são muito importantes e a isto deve-se atenção especial.

A cada etapa, o erro introduzido ao se limitar o número de casas decimais é chamado de erro de arredondamento. Em problemas lineares o efeito destes erros se superpõem durante a solução. O uso de uma malha de pequenas dimensões, ainda que

contribua para uma melhor aproximação da equação diferencial, aumenta o efeito acumulativo do erro de arredondamento. Por isso, não se pode dizer sempre que, diminuindo o tamanho da malha, aumenta-se a precisão de cálculo em diferenças finitas. Por outro lado, conduzindo o cálculo numérico à estágios intermediários de duas ou mais casas decimais, ajuda-se a reduzir o efeito acumulativo do erro de arredondamento.

A distribuição do erro de arredondamento se assemelha muito à forma de um processo randômico, e é provável que os efeitos destes erros se cancelem durante as etapas de cálculo, sendo, impossível de se determinar exatamente a ordem de grandeza do desvio na solução da equação devido ao erro de arredondamento.

Quando se expressa uma equação diferencial parcial em diferenças finitas, usando expansão em séries de Taylor, a série é interrompida após um certo número de termos. O erro envolvido em cada etapa do cálculo, resultado da interrupção das séries, é chamado erro de truncamento. Nas equações utilizadas neste modelo estudado, a ordem de grandeza do erro de truncamento é de $(\Delta\xi)^2$, à cada etapa de cálculo.

b) Estabilidade da Solução

Mesmo sabendo que durante as etapas de cálculo, os erros de arredondamento e truncamento são cuidadosamente observados para que permaneçam em pequenas dimensões, algum desvio é introduzido na solução por diferenças finitas. Seja Y, o valor máximo absoluto do erro introduzido no cálculo para cada ponto da malha, e Z* o

resultado numérico da equação diferencial com diferenças finitas. Se Z é a solução da equação diferencial com diferenças finitas, assumindo que nenhum erro é introduzido no cálculo, a diferença $\left[Z^* - Z \right]$ é o desvio da solução numérica, resultante dos erros.

A solução da equação das diferenças finitas é considerada estável se o valor $\left[Z^* - Z \right]$ tender a zero, tal que Y tenda a zero e não aumentar exponencialmente quando o tamanho da malha tender a zero, conforme SMITH [32] .

A consideração de estabilidade é importante na solução da equação. Alguns métodos tem sido citados na literatura para estabelecer as condições de estabilidade. RICHTMEYER [33], utiliza o método da expansão em séries na análise da estabilidade de equações de condução de calor dependentes do tempo. Este método não inclui automaticamente os efeitos das condições de contorno na estabilidade do sistema de diferenças. Um método matricial, descrito por SMITH [32], inclui os efeitos das condições de contorno na estabilidade de tais sistemas.

Evidencia-se neste ponto que, o tipo de equação diferencial e o tipo de condição de contorno, terão influência na escolha do esquema de diferenciação utilizado. Em conformidade, o critério de estabilidade não pode ser generalizado para todos os sistemas empregados. Cada sistema deve ser examinado individualmente, para verificar sua estabilidade.

Para verificação deste fato, analizaremos a equação (80),

a qual irá representar o comportamento da temperatura do material na interface líquido-sólido.

Substituindo (81), (82), (102), (103) e (104) em (101), para $\Delta x = \Delta r$, teremos :

$$T_m(i,j)\Big|_{\theta+1} = \frac{\alpha\Delta\theta}{(\Delta x)^2}\left[\left[\frac{(\Delta x)^2}{\alpha\Delta\theta} - 2 + \frac{h(1-U)\,(\Delta x)^2}{(r_2-r_1)\,K_m U}\right] T_m(i.j)\Big|_{\theta} + \right.$$

$$+ \left[T_m(i+2,j)\Big|_{\theta} - 2T_m(i+1,j)\Big|_{\theta} + T_m(i,j+2)\Big|_{\theta} - 2T_m(i,j+1)\Big|_{\theta}\right] +$$

$$\left. + \left[\frac{h_q(1-U)\,(\Delta x)^2}{(r_2-r_1)\,K_m\,U}\right] T_{fq}(i)\Big|_{\theta}\right] \qquad (108)$$

Substituindo (69) em (108) e reescrevendo, temos :

$$T_m(i,j)\Big|_{\theta+1} = \frac{\alpha\Delta\theta}{(\Delta x)^2}\left[\frac{B_{iq}(1-U)\,(\Delta x)^2}{(r_2 - r_1)^2\,U} T_{fq}(i)\Big|_{\theta} + T_m(i+2,j)\Big|_{\theta} - \right.$$

$$- 2T_m(i+1,j)\Big|_{\theta} + T_m(i,j+2)\Big|_{\theta} - 2T_m(i,j+1)\Big|_{\theta} + \left[\frac{(\Delta x)^2}{\alpha\Delta\theta} - 2 + \right.$$

$$\left. \left. + \frac{B_{iq}(1-U)\,(\Delta x)^2}{(r_2 - r_1)^2\,U}\right] T_m(i,j)\Big|_{\theta}\right] \qquad (109)$$

A seleção do parâmetro $\frac{(\Delta x)^2}{\alpha \Delta \theta}$ na equação (108), requer influência na escolha e irá determinar o modo com que a magnitude deste coeficiente contribuirá para a estabilidade do método. A escolha do valor deste parâmetro é indicada por OZISIK [34], de tal modo que o coeficiente de $T_m(i,j)\Big|_{\theta}$, seja nulo.

Da equação (108) temos que:

$$\frac{(\Delta x)^2}{\alpha \Delta \theta} - 2 + \frac{B_{iq}(1-U)(\Delta x)^2}{(r_2 - r_1)^2 U} = 0 \qquad (110)$$

Portanto,

$$\frac{(\Delta x)^2}{\alpha \Delta \theta} = \frac{-B_{iq}(1-U)(\Delta x)^2}{(r_2 - r_1)^2 U} + 2 \qquad (111)$$

3.5 O PROGRAMA COMPUTACIONAL

A listagem do programa desenvolvido, encontra-se no Apêndice 1, com indicações detalhadas das grandezas e sub-rotinas utilizadas.

Os resultados teóricos deste programa estão no item 5.3; 5.4; 5.5; 5.6; 5.7 e 5.8.

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 4

ROTEIRO DE CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO E DO CALOR ARMAZENADO

4.1 SELEÇÃO DOS MODELOS TEÓRICOS

Na escolha dos materiais para teste dos modelos teóricos, objetivou-se uma aproximação de situações que possam ser encontradas na prática e também uma adequação às hipóteses feitas no equacionamento matemático.

Foram escolhidos o aço como material armazenador, o óleo térmico e a água como fluidos transportadores de calor, sendo o óleo térmico o fluido quente e a água o fluido frio.

As propriedades térmicas dos materiais escolhidos estão descritos na tabela 5.1 .

4.2 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PELÍCULA (h)

Para a determinação de h, foram feitas as seguintes considerações :

1) As propriedades do fluido avaliadas para a temperatura média da mistura;

2) O efeito da temperatura da parede e a temperatura média da mistura para a qual foram determinadas as propriedades do fluido, corrigido pela utilização da relação $\left[\frac{(\mu_b)}{(\mu_p)}\right]^{0,14}$ conforme SIEDER [35] ;

3) Perfil hidrodinamicamente desenvolvido;

4) Taxa de calor constante, devido a maior capacidade térmica do fluido transportador de calor;

5) Perfil térmico em desenvolvimento, pois o modelo é de pequeno comprimento. (L < 0,05 PeDi, KAYS [28]).

Com estas considerações, escolhemos o cálculo do Nu local (Nu_x), conforme HAUSEN [36] :

Para o FLUIDO QUENTE

$$Nu_{x_{fq}} = 4,36 + \frac{0,023\,(Di/x)\,Re_{fq}.Pr_{fq}}{1 + 0,0012\,(Di/x)Re_{fq}.Pr_{fq}} \qquad (112)$$

Para o FLUIDO FRIO

$$Nu_{x_{ff}} = 4,36 + \frac{0,023(De/x)\ Re_{ff}.Pr_{ff}}{1 + 0,0012\ (De/x)Re_{ff}.Pr_{ff}} \qquad (113)$$

4.3 ROTEIRO DE CÁLCULO PARA O CALOR ARMARZENADO

Com os resultados obtidos pelo método matemático computacional, o calor armazenado foi calculado através da análise da figura 6 e da generalização que resumiremos neste item.

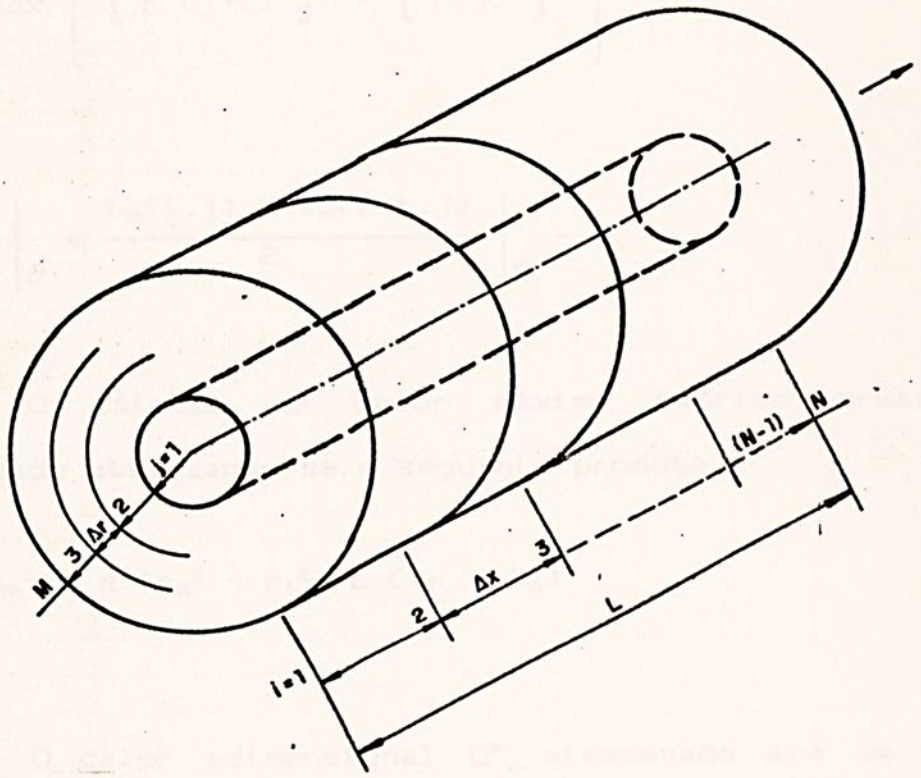


FIGURA 6 - ESQUEMA UTILIZADO PARA O CÁLCULO DO CALOR ARMAZENADO.

$$\bar{Q} = \sum_{\theta=1}^{z} Q_\theta \qquad (114)$$

onde,

$$Q_\theta = \rho_m \, c_m \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{N-1} V(j) \, \Delta t_m(i,j) \Big|_\theta \qquad (115)$$

Para :

$$V(j) = \pi \Delta x \left[\left[r\,(j+1) \right]^2 - \left[r(j) \right]^2 \right] \qquad (116)$$

e

$$\Delta t_m(i,j) \Big|_\theta = \frac{t_m(i,j) + t_m(i+1,j)}{2} \Big|_\theta - t_o \qquad (117)$$

O cálculo do calor máximo teórico armazenável, é determinado utilizando-se o seguinte produto :

$$Q_{max} = \rho_m \, c_m \, \pi \, (r_2^2 - r_1^2) \, L \, (t_{fi} - t_o) \qquad (118)$$

O calor adimensional Q^*, armazenado até um determinado instante θ é dado pela relação :

$$Q^* = \frac{\bar{Q}}{Q_{max}} \qquad (119)$$

4.4 DETERMINAÇÃO DA EFETIVIDADE

Para empregar termos utilizados na análise de parâmetros de trocadores de calor, definimos efetividade como sendo a relação entre o calor real trocado e a máxima troca de calor possível, ou seja :

$$\varepsilon = \frac{Q_{real}}{Q_{max}} \qquad (120)$$

mas

$$Q_{real_{fq}} = C_{fq} \left[T_{fq}(1) - T_{fq}(11) \right] \qquad (121)$$

$$Q_{real_{ff}} = C_{ff} \left[T_{ff}(1) - T_{ff}(11) \right] \qquad (122)$$

$$Q_{max} = C_{min} \left[T_{fq}(1) - T_{ff}(11) \right] \qquad (123)$$

onde :

$T_{fq}(1)$ → é a temperatura de entrada do fluido quente

$T_{fq}(11)$ → é a temperatura de saída do fluido quente

$T_{ff}(11)$ → é a temperatura de entrada do fluido frio

$T_{ff}(1)$ → é a temperatura de saída do fluido frio

sendo

$$C_{fq} = \dot{m}_{fq}\, c_{fq} \qquad (124)$$

$$C_{ff} = \dot{m}_{ff}\, c_{ff} \qquad (125)$$

C_{min} - é o menor valor encontrado entre os valores de C_{fq} e C_{ff}.

No modelo que estamos estudando $\dot{m}_{fq}c_{fq} > \dot{m}_{ff}c_{ff}$ então:

$$C_{min} = \dot{m}_{ff} \cdot c_{ff} \qquad (126)$$

Substituindo (121), (122) e (123) em (120) vem :

$$\varepsilon_q = \frac{\dot{m}_{fq} \cdot c_{fq} \left[T_{fq}(1) - T_{fq}(11) \right]}{C_{min} \left[T_{fq}(1) - T_{ff}(11) \right]} \qquad (127)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\dot{m}_{ff} \cdot c_{ff} \left[T_{ff}(1) - T_{ff}(11) \right]}{C_{min} \left[T_{fq}(1) - T_{ff}(11) \right]} \qquad (128)$$

4.5 DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO DO ARMAZENADOR

O método que tem sido utilizado para calcular o desempenho de armazenadores de calor sensível [37], que é sujeito à um degrau na temperatura de entrada do fluido de transporte, consiste em se integrar a diferença das temperaturas entre a entrada e a saída do fluido transportador de calor no período do teste e multiplicar o resultado pela taxa de fluxo mássico e o calor específico, dividindo-se este valor pela capacidade máxima de armazenamento do material.

Aqui, como temos simultaneamente dois fluidos em contato com o material armazenador, onde o fluido quente fornecendo e o fluido frio recebendo energia, podemos então fazer o seguinte balanço :

$$Q_{ffq} = Q_{ac} + Q_{rff} \qquad (129)$$

Então :

$$Q_{ac} = Q_{ffa} - Q_{rff} \qquad (130)$$

Podemos então definir o desempenho do armazenador como :

$$\beta = \frac{Q_{ac}}{Q_{ffa}} \qquad (131)$$

CAPÍTULO 5

CAPITULO 5

RESULTADOS

A partir das equações obtidas nos capítulos (2), (3) e (4), foi feito um programa para simular um trocador de calor-armazenador cilíndrico com dois fluidos de transporte escoando em contra-corrente.

O fluido quente escoa na parte interna do cilindro e o fluido frio escoa na parte externa.

5.1 ESPECIFICAÇÕES DOS MATERIAIS UTILIZADOS

	PROPRIEDADES A 300K		
MATERIAL	CONDUT. TERMICA(k) kw/m.K	CALOR ESP.(c) kj/kgK	MASSA ESPEF.(ρ) kg/m^3
AÇO	0,064	0,434	7832
ÓLEO TÉRMICO	0,000129	1,64	995
ÁGUA	0,000613	4,10	995

Tabela 5.1 Especificações dos materiais a 300K

5.2 CONDIÇÕES UTILIZADAS PARA OPERACIONALIZAR O PROGRAMA

Para proporcionar a análise dos resultados, as condições utilizadas no programa computacional foram divididas em seis partes que estão listadas a seguir.

PROGRAMA (NOME)	TEMP. DE ENTRADA DO FLUIDO QUENTE	VALOR DE U = $\frac{r_1}{r_2}$
MECONS 1	constante	0,5
MECONS 2	constante	0,4
MECONS 3	constante	0,3
MEVAR 1	variável	0,5
MEVAR 2	variável	0,4
MEVAR 3	variável	0,3

Tabela 5.2 Condições dos Programas Computacionais

5.3 RESULTADOS DO PROGRAMA MECONS 1

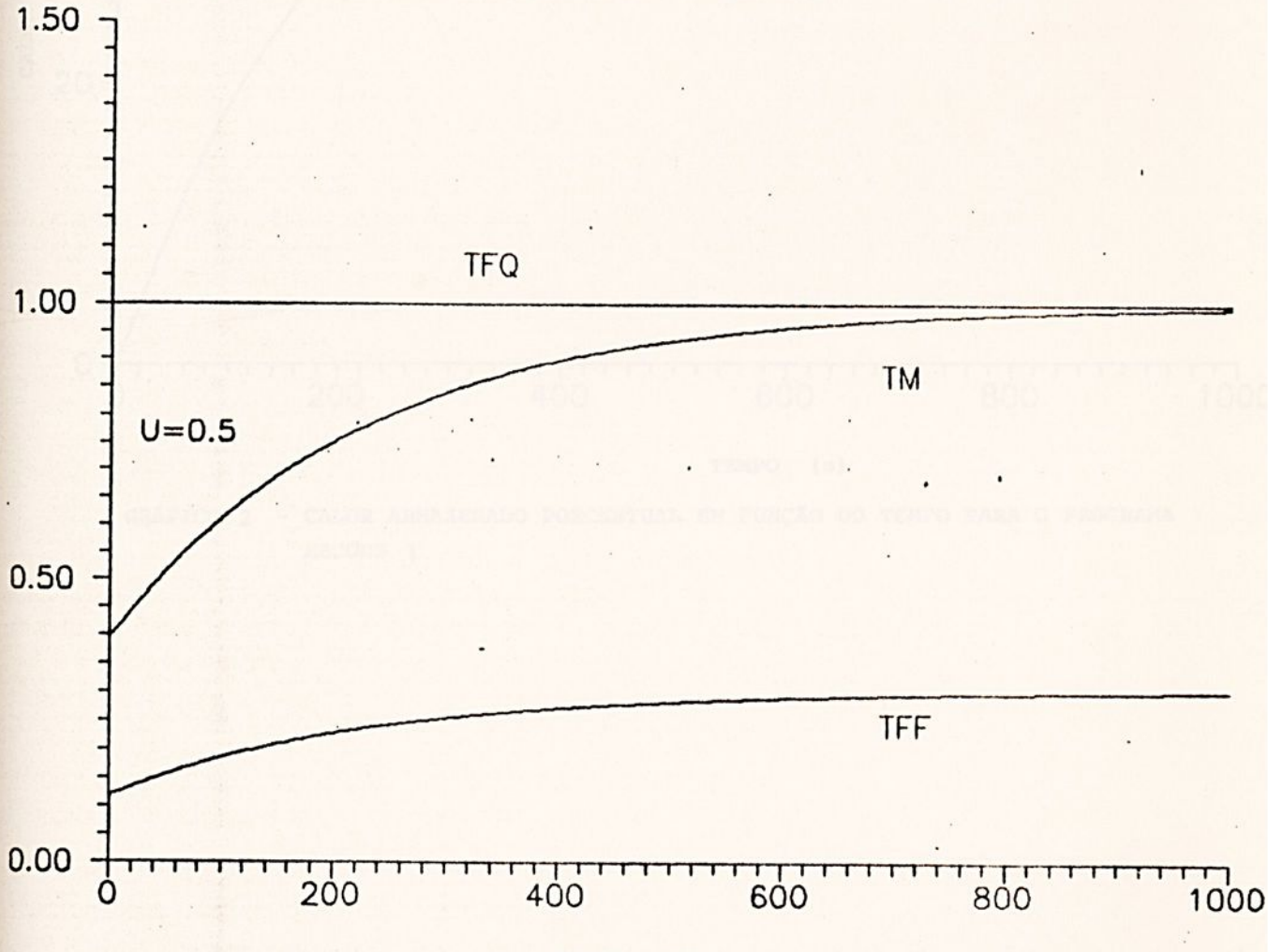


GRÁFICO 1 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MECONS 1

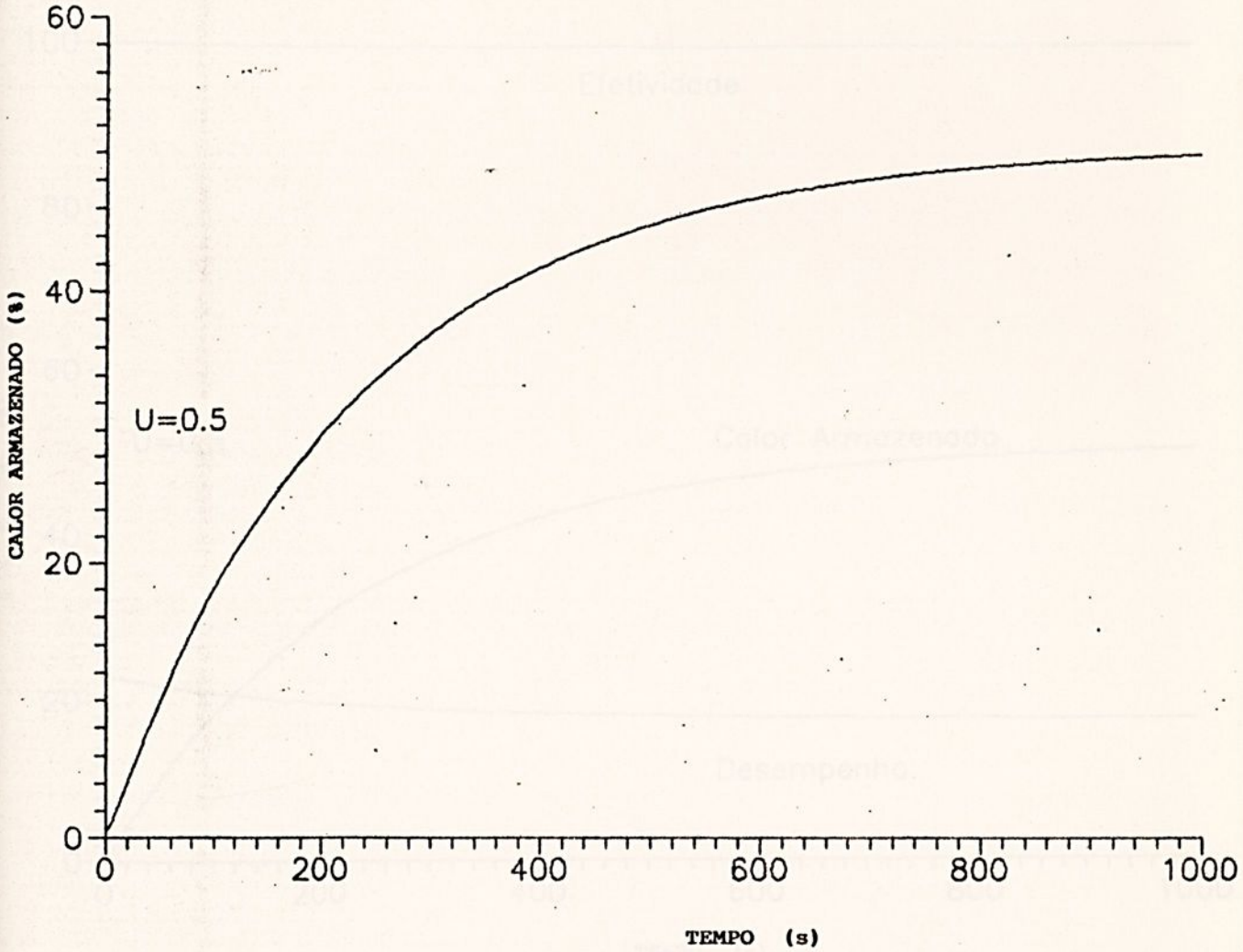


GRÁFICO 2 - CALOR ARMAZENADO PORCENTUAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MECONS 1

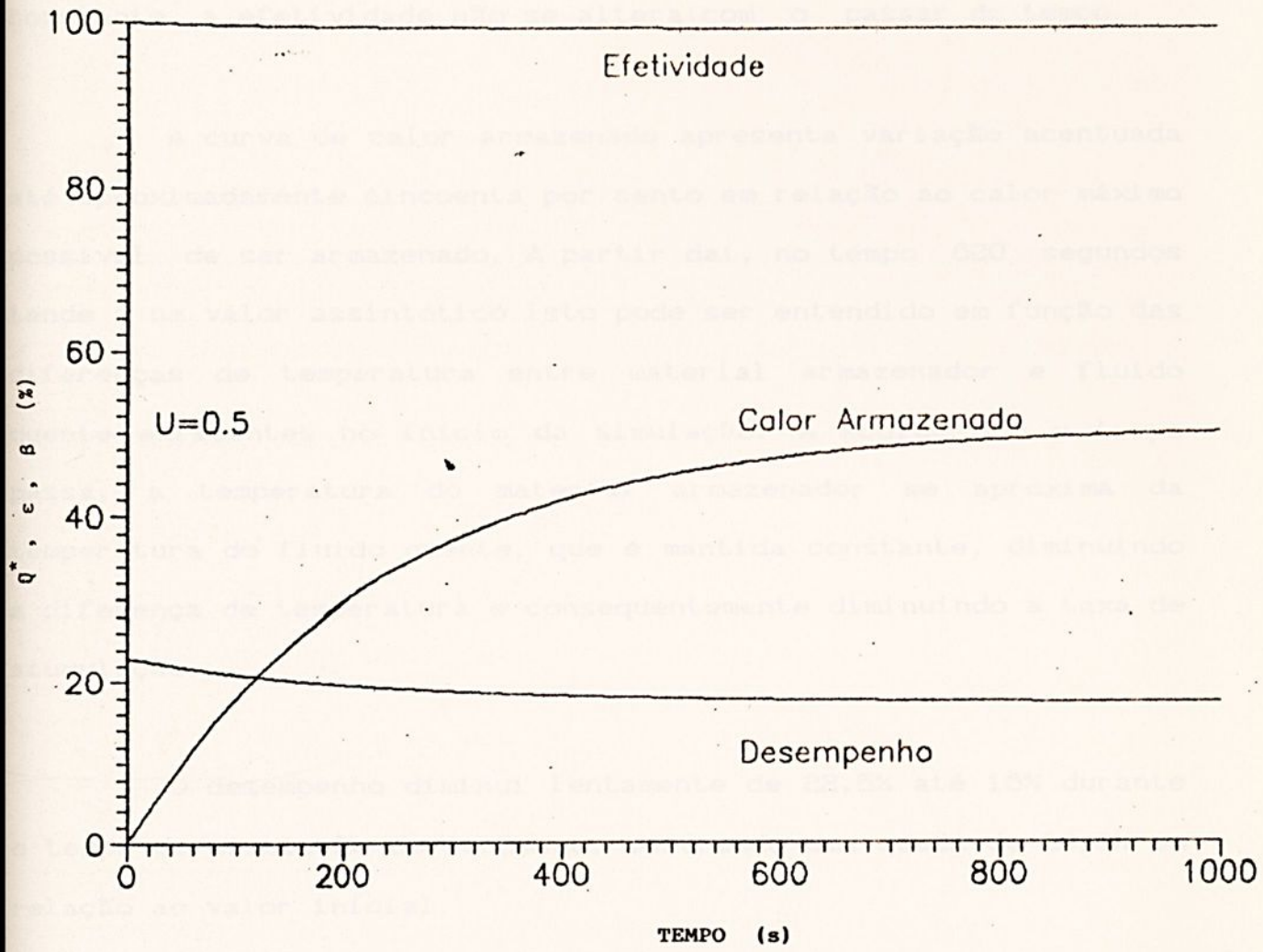


GRÁFICO 3 - CALOR ARMAZENADO, EFETIVIDADE E DESEMPENHO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MECONS 1

5.3.1 DISCUÇÕES SOBRE OS RESULTADOS DO MECONS 1

Como a temperatura de entrada do fluido quente é constante, a efetividade não se altera com o passar do tempo.

A curva de calor armazenado apresenta variação acentuada até aproximadamente cincoenta por cento em relação ao calor máximo possível de ser armazenado. A partir daí, no tempo 620 segundos tende a um valor assintótico. Isto pode ser entendido em função das diferenças de temperatura entre material armazenador e fluido quente existentes no início da simulação. À medida que o tempo passa, a temperatura do material armazenador se aproxima da temperatura do fluido quente, que é mantida constante, diminuindo a diferença de temperatura e consequentemente diminuindo a taxa de acumulação.

O desempenho diminui lentamente de 22,5% até 16% durante o tempo de simulação do fenômeno, mostrando uma queda de 28,6% em relação ao valor inicial.

O comportamento do aumento das temperaturas do fluido frio e do material armazenador estão de acordo com o esperado, sendo que o aumento da temperatura do material armazenador é mais acentuado até o tempo 500 segundos , e torna-se menos acentuado a partir daí em função da diminuição dos gradientes de temperatura que são decorrentes da aproximação da temperatura do material armazenador à temperatura do fuido quente. A temperatura do fluido frio aumenta gradualmente até o tempo 500

seg. e a partir daí tende a um valor assintótico.

Percebe-se que os gradientes de temperatura entre fluido quente e material armazenador diminuem com o passar do tempo, enquanto os gradientes de temperatura entre o material armazenador e o fluido frio aumentam com o passar do tempo. Podemos entender este comportamento, considerando que a taxa de transferência de calor do fluido quente para o material armazenador é maior do que a taxa de transferência de calor do material armazenador para o fluido frio.

5.4 RESULTADOS DO PROGRAMA MECONS 2

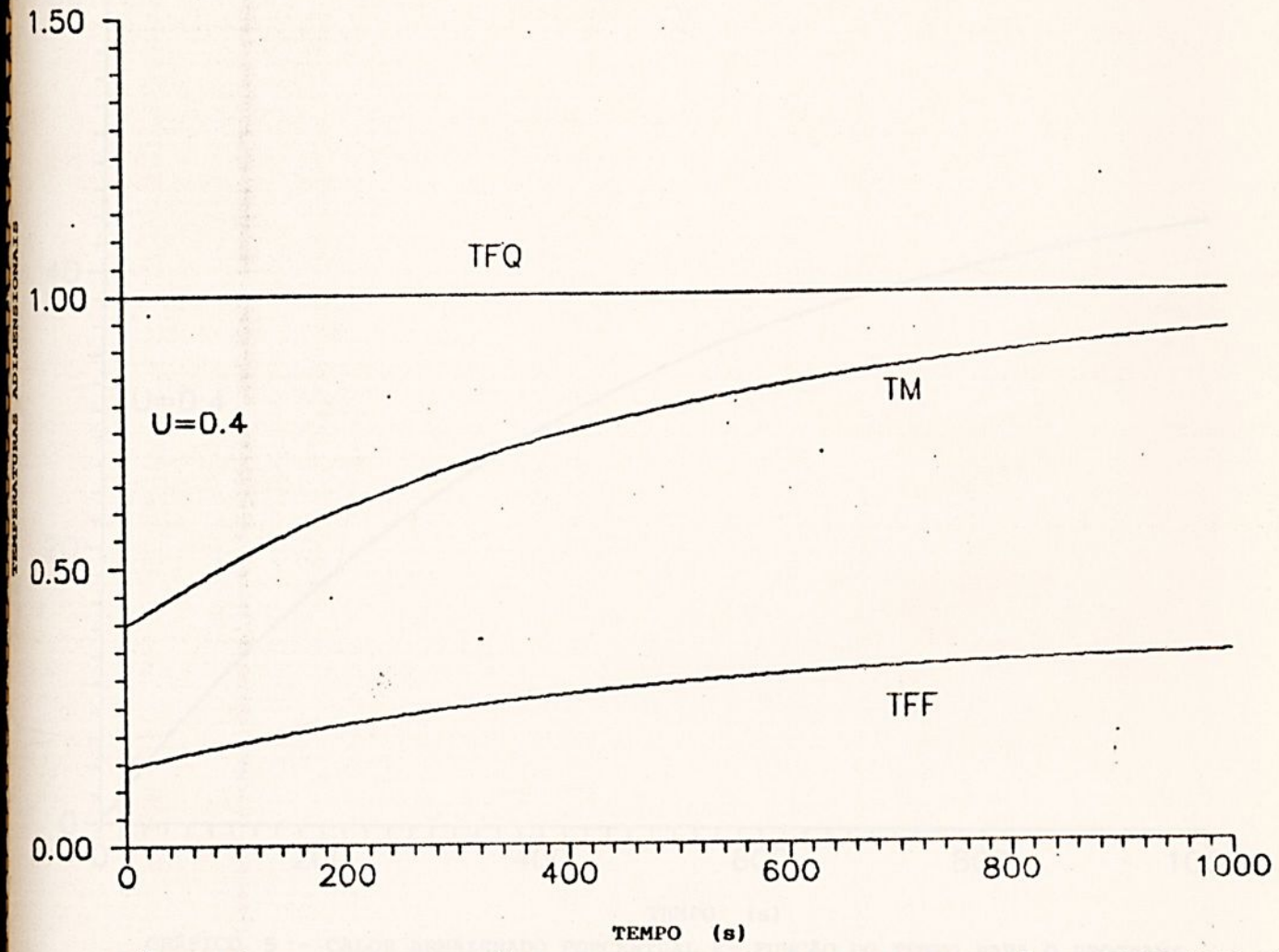


GRÁFICO 4 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MECONS 2

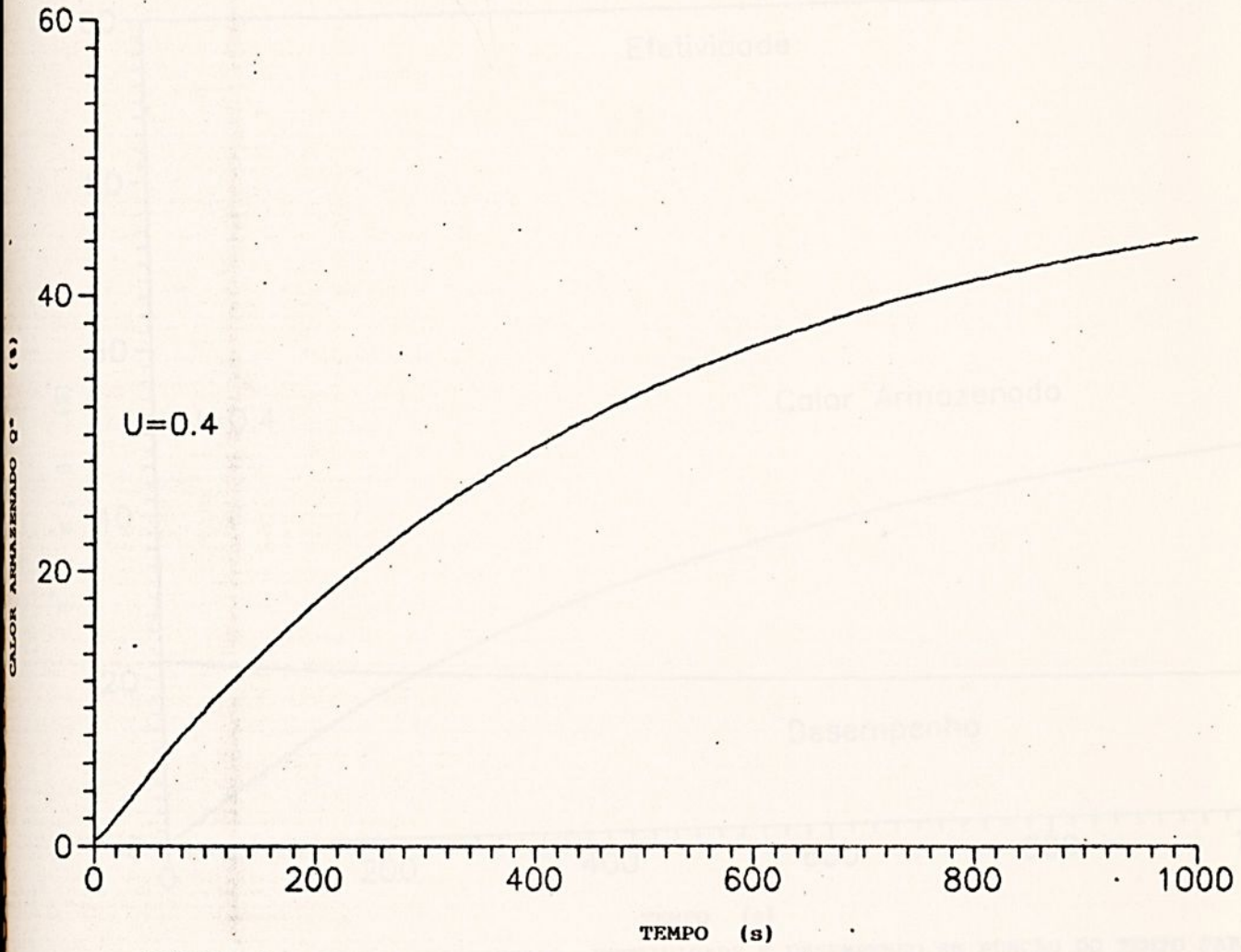


GRÁFICO 5 - CALOR ARMAZENADO PORCENTUAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MECONS 2

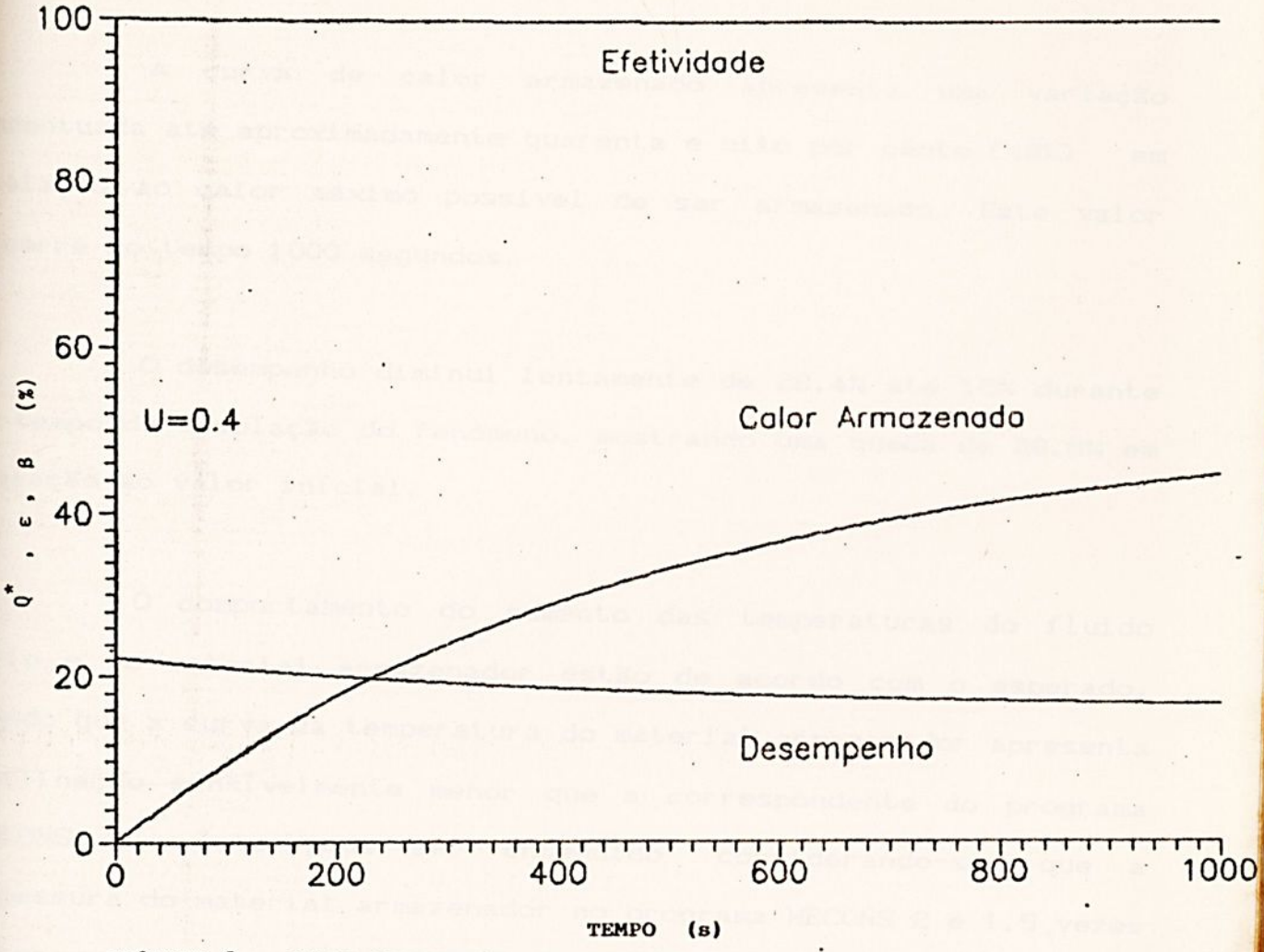


GRÁFICO 6 - CALOR ARMAZENADO, EFETIVIDADE E DESEMPENHO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MECONS 2

5.4.1 DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS DO MECONS 2

Como a temperatura de entrada do fluido quente é constante, a efetividade não se altera com o passar do tempo.

A curva de calor armazenado apresenta uma variação acentuada até aproximadamente quarenta e oito por cento (48%) em relação ao calor máximo possível de ser armazenado. Este valor ocorre no tempo 1000 segundos.

O desempenho diminui lentamente de 22,4% até 16% durante o tempo de simulação do fenômeno, mostrando uma queda de 28,6% em relação ao valor inicial.

O comportamento do aumento das temperaturas do fluido frio e do material armazenador estão de acordo com o esperado, sendo que a curva da temperatura do material armazenador apresenta inclinação sensivelmente menor que a correspondente do programa MECONS 1. Isto pode ser entendido considerando-se que a espessura do material armazenador no programa MECONS 2 é 1,5 vezes maior que a espessura do material armazenador no programa MECONS 1. Na curva da temperatura do fluido frio, a diferença de inclinação não é tão acentuada.

Aqui também são válidas as discussões apresentadas em 5.3.1.

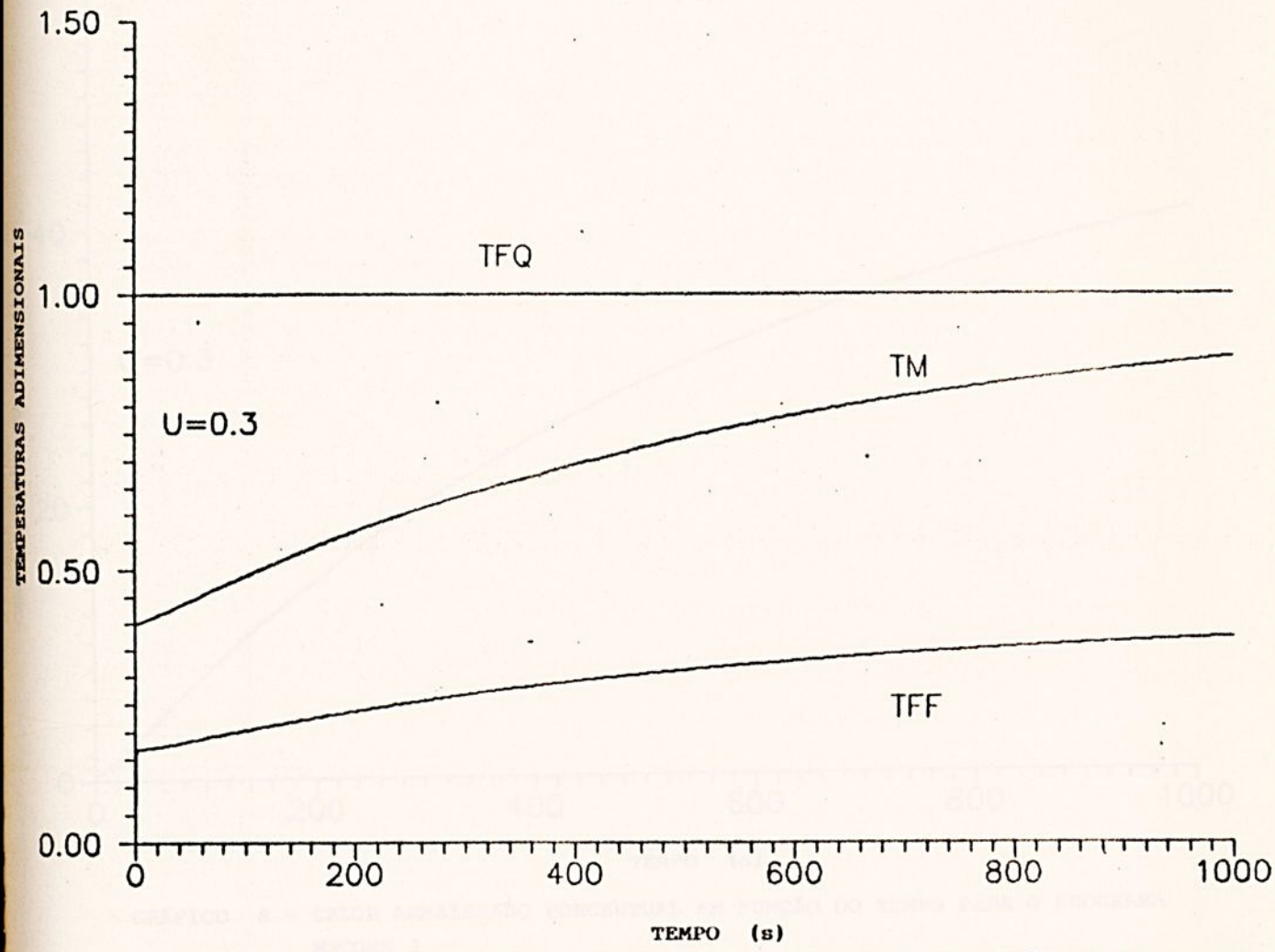


GRÁFICO 7 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MECONS 3

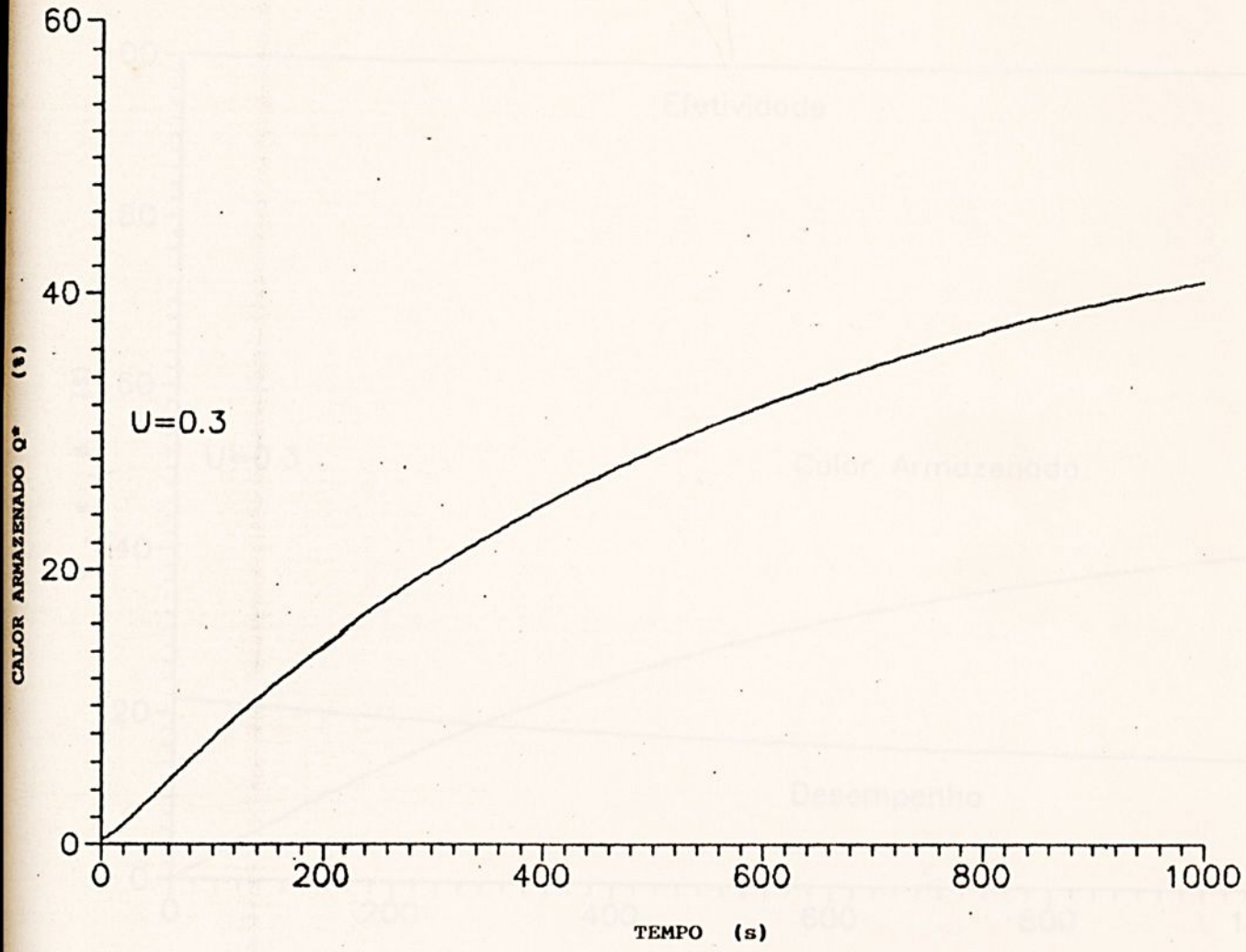


GRÁFICO 8 - CALOR ARMAZENADO PORCENTUAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MECONS 3

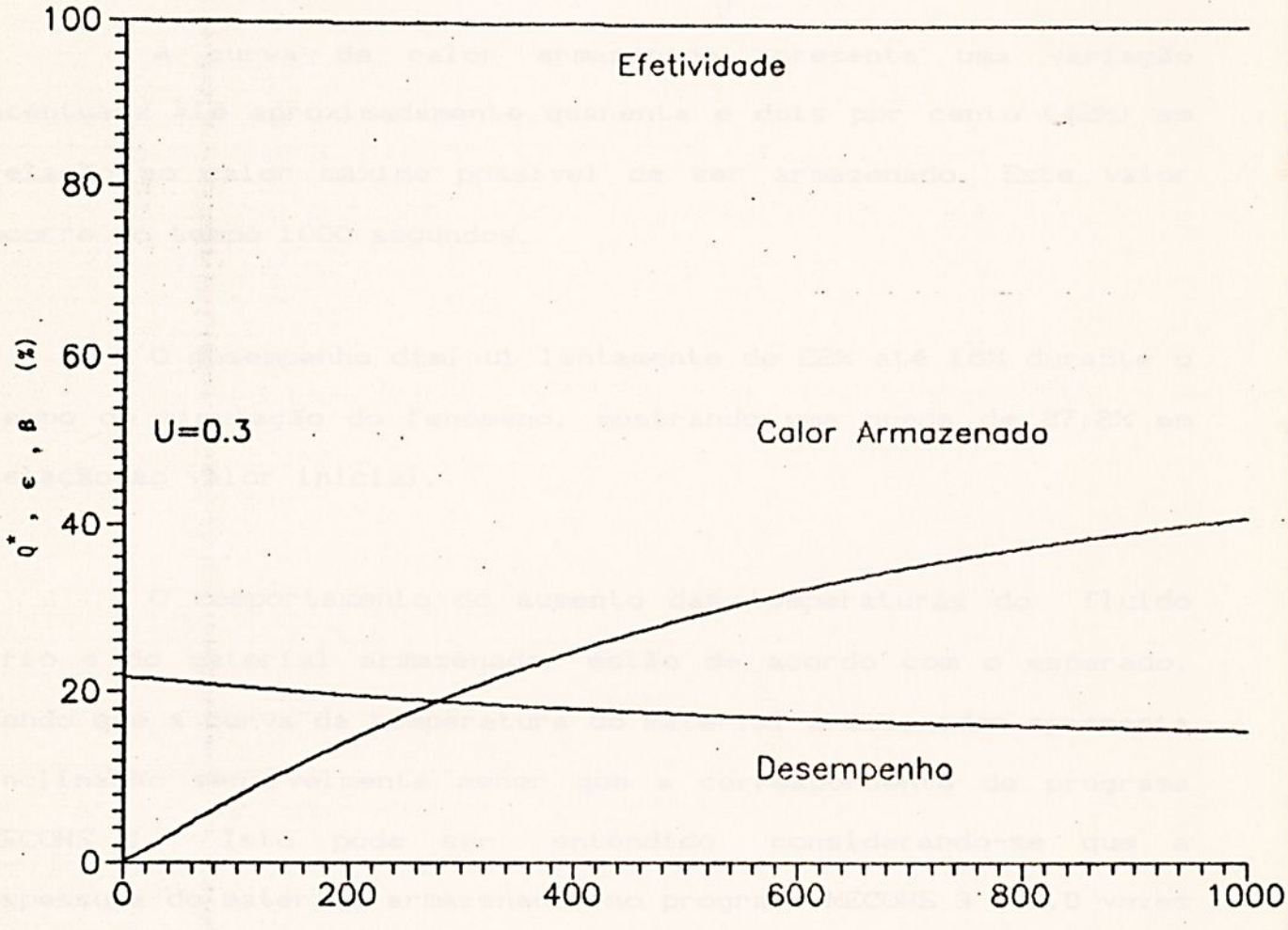


GRÁFICO 9 - CALOR ARMAZENADO, EFETIVIDADE E DESEMPENHO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MECONS 3

5.5.1 DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS DO MECONS 3

Como a temperatura de entrada do fluido quente é constante, a efetividade não se altera com o passar do tempo.

A curva de calor armazenado apresenta uma variação acentuada até aproximadamente quarenta e dois por cento (42%) em relação ao calor máximo possível de ser armazenado. Este valor ocorre no tempo 1000 segundos.

O desempenho diminui lentamente de 22% até 16% durante o tempo de simulação do fenômeno, mostrando uma queda de 27,2% em relação ao valor inicial.

O comportamento do aumento das temperaturas do fluido frio e do material armazenador estão de acordo com o esperado, sendo que a curva da temperatura do material armazenador apresenta inclinação sensivelmente menor que a correspondente do programa MECONS 1. Isto pode ser entendido considerando-se que a espessura do material armazenador no programa MECONS 3 é 2,0 vezes maior que a espessura do material armazenador no programa MECONS 1. Na curva da temperatura do fluido frio, a diferença de inclinação existe mas não é tão acentuada.

Aqui também são válidas as discussões apresentadas em 5.3.1.

5.6 RESULTADOS DO PROGRAMA MEVAR 1

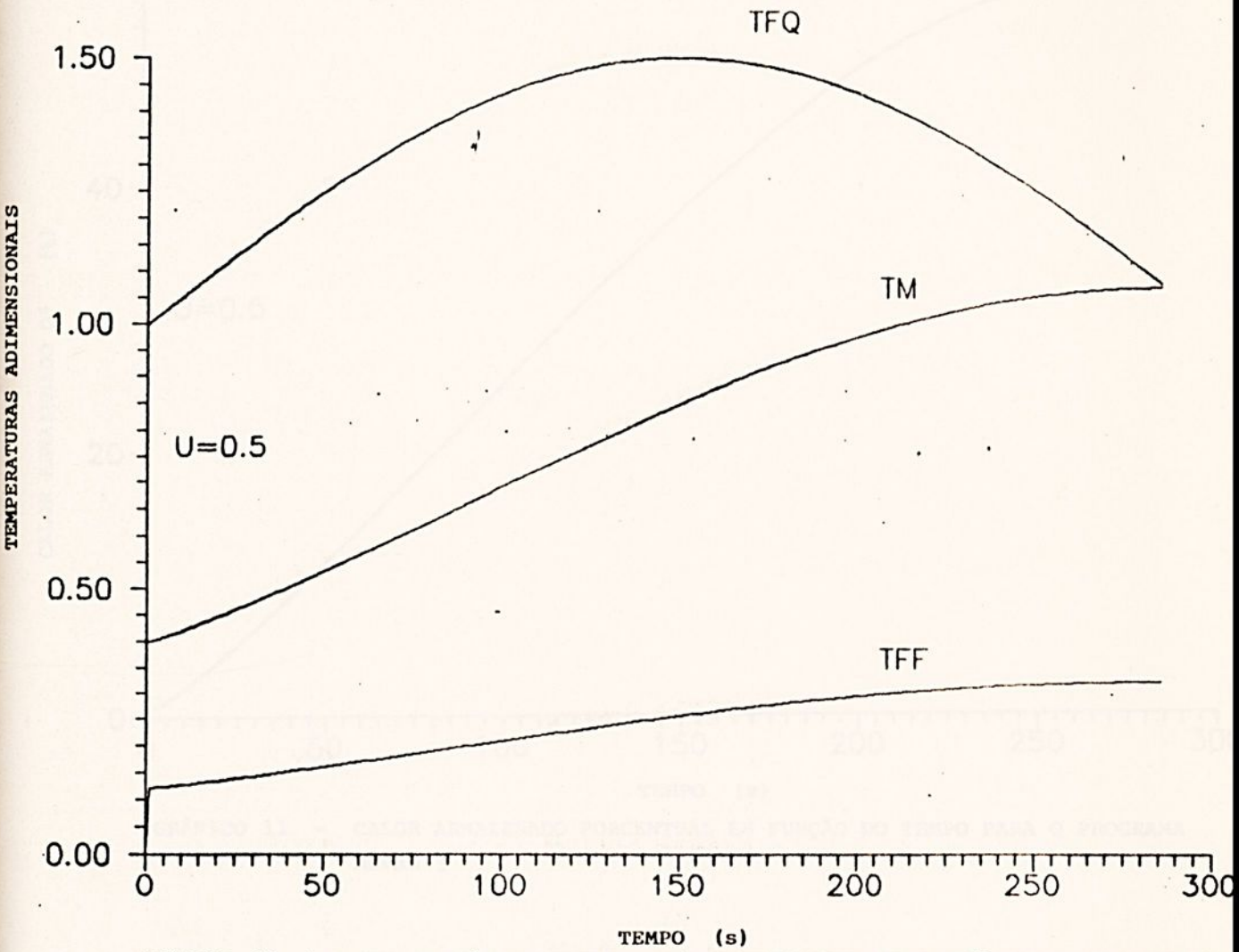


GRÁFICO 10- DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MEVAR 1

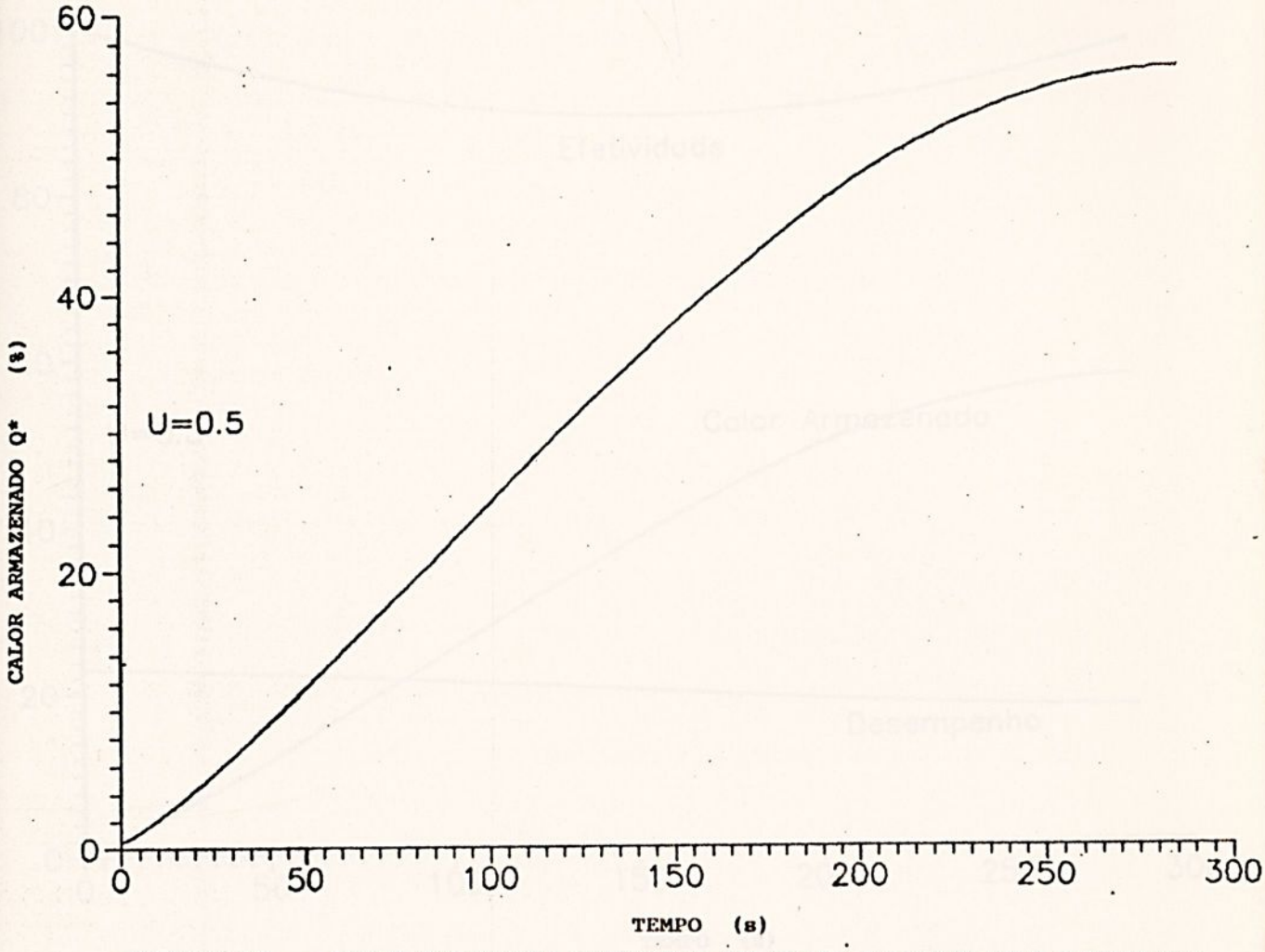


GRÁFICO 11 - CALOR ARMAZENADO PORCENTUAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MEVAR 1

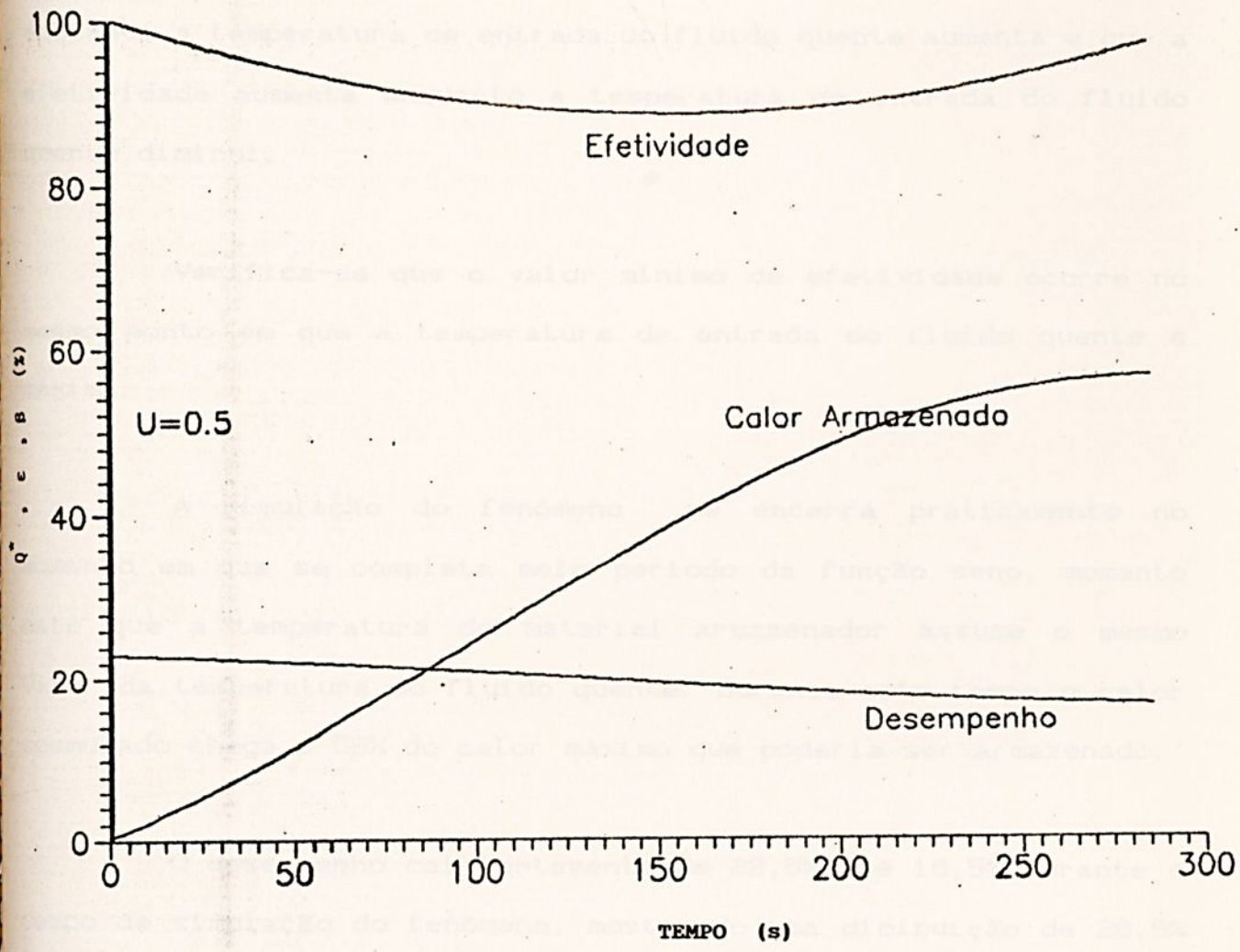


GRÁFICO 12 - CALOR ARMAZENADO, EFETIVIDADE E DESEMPENHO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MEVAR 1

5.6.1 DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS DO MEVAR 1

Como a temperatura de entrada do fluido quente é variável (segundo uma função seno) percebe-se que a efetividade diminui enquanto a temperatura de entrada do fluido quente aumenta e que a efetividade aumenta enquanto a temperatura de entrada do fluido quente diminui.

Verifica-se que o valor mínimo de efetividade ocorre no mesmo ponto em que a temperatura de entrada do fluido quente é máxima.

A simulação do fenômeno se encerra praticamente no momento em que se completa meio período da função seno, momento este que a temperatura do material armazenador assume o mesmo valor da temperatura do fluido quente. Durante este tempo o calor acumulado chega a 58% do calor máximo que poderia ser armazenado.

O desempenho cai lentamente de 22,5% até 16,5% durante o tempo de simulação do fenômeno, mostrando uma diminuição de 26,6% em relação ao valor inicial.

O comportamento do aumento das temperaturas do fluido frio e do material armazenador estão de acordo com o esperado, sendo que o aumento da temperatura do material armazenador ocorre linearmente (inclinação constante) até o momento em que a temperatura de entrada do fluido quente atinge o seu valor máximo. A partir daí, a temperatura do material armazenador passa a ter incrementos menores, apresentando diminuição da inclinação da

curva de temperatura do material armazenador.

As diferenças de temperatura entre fluido quente e o material armazenador aumentam até o tempo 120 segundos e à partir daí diminuem até chegar a zero, no momento em que a temperaturade entrada do fluido quente se iguala à do material armazenador.

As diferenças de temperatura entre o material armazenador e o fluido frio aumentam do início até o final da simulação.

5.7 RESULTADOS DO PROGRAMA MEVAR 2

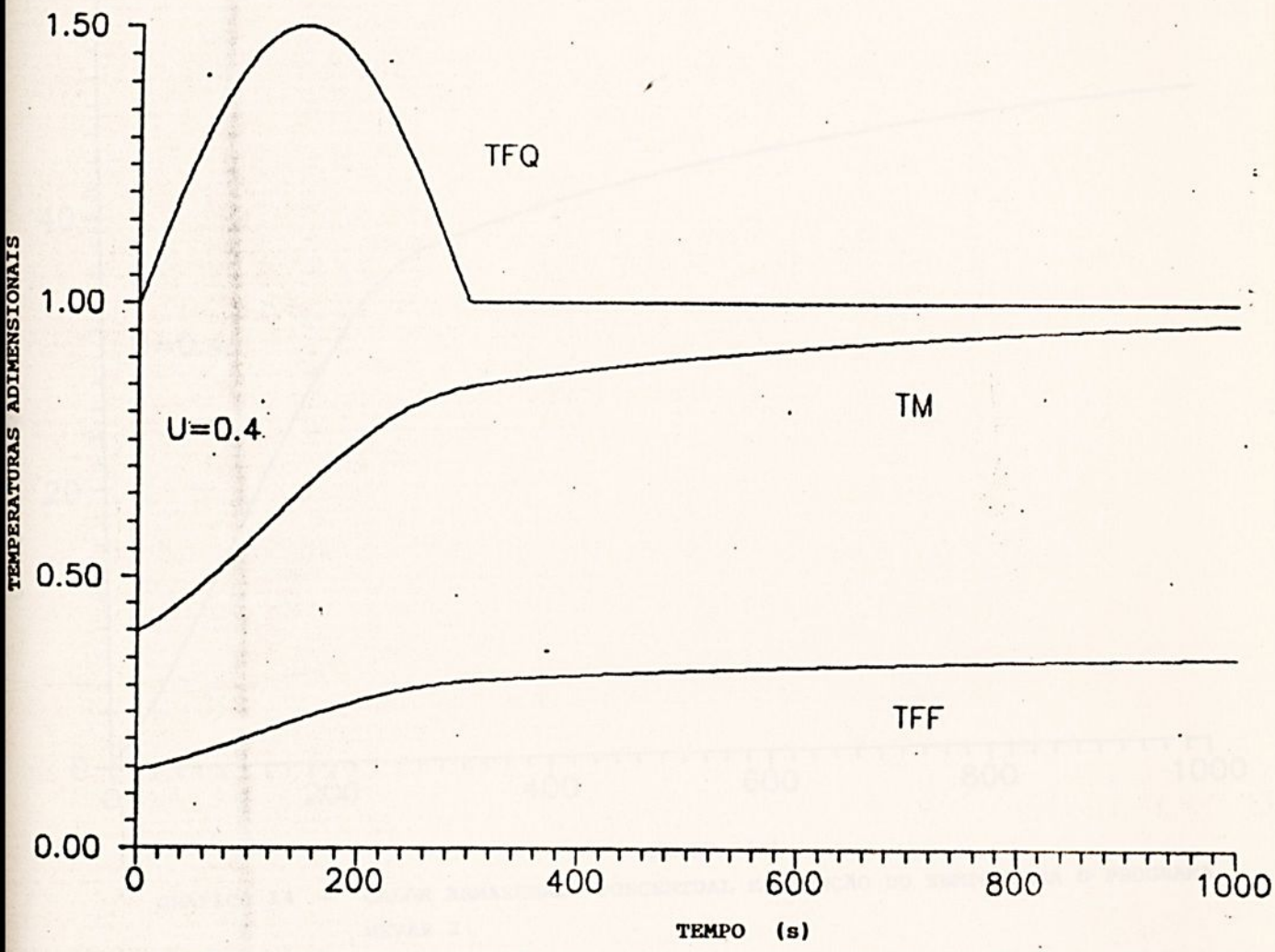


GRÁFICO 13 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MEVAR 2

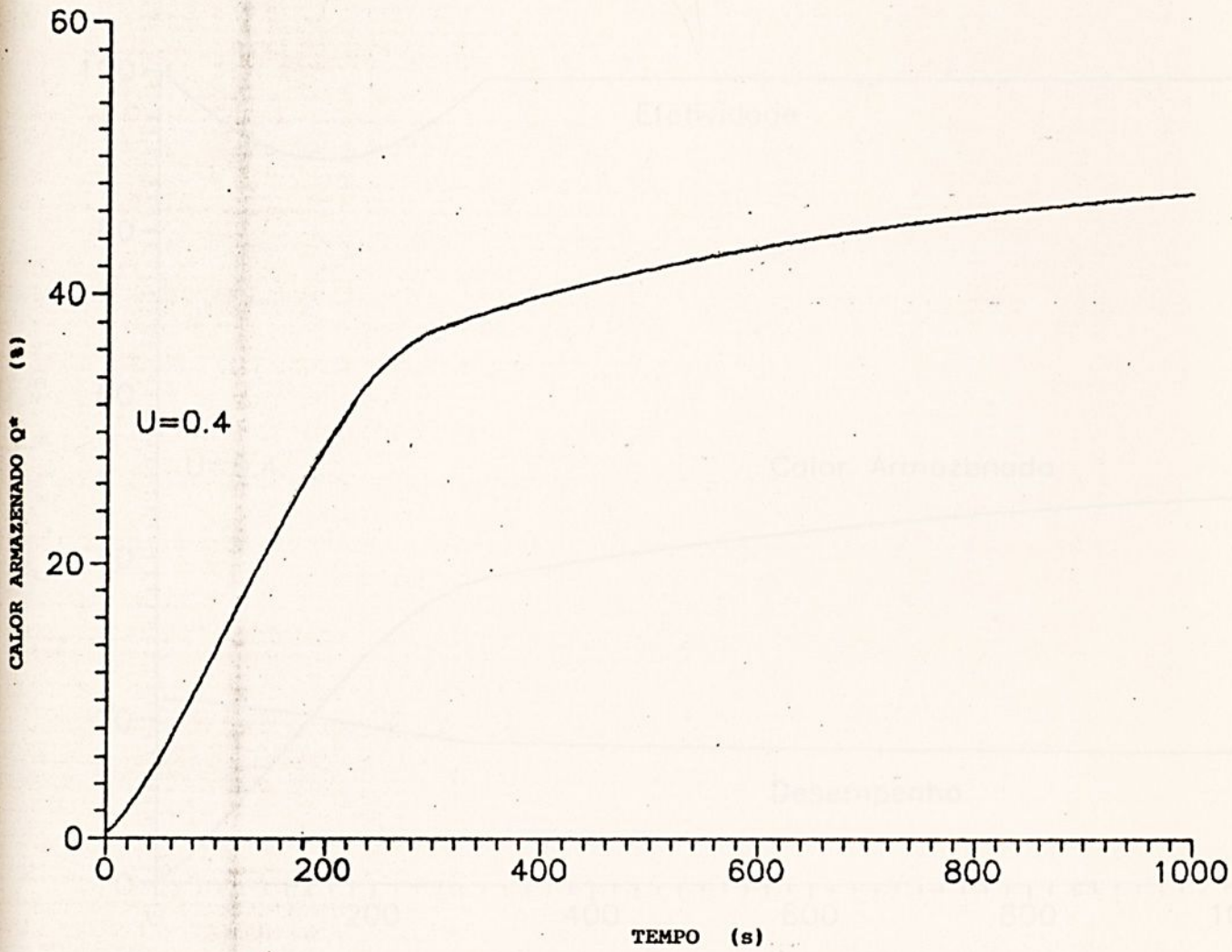


GRÁFICO 14 - CALOR ARMAZENADO PORCENTUAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MEVAR 2

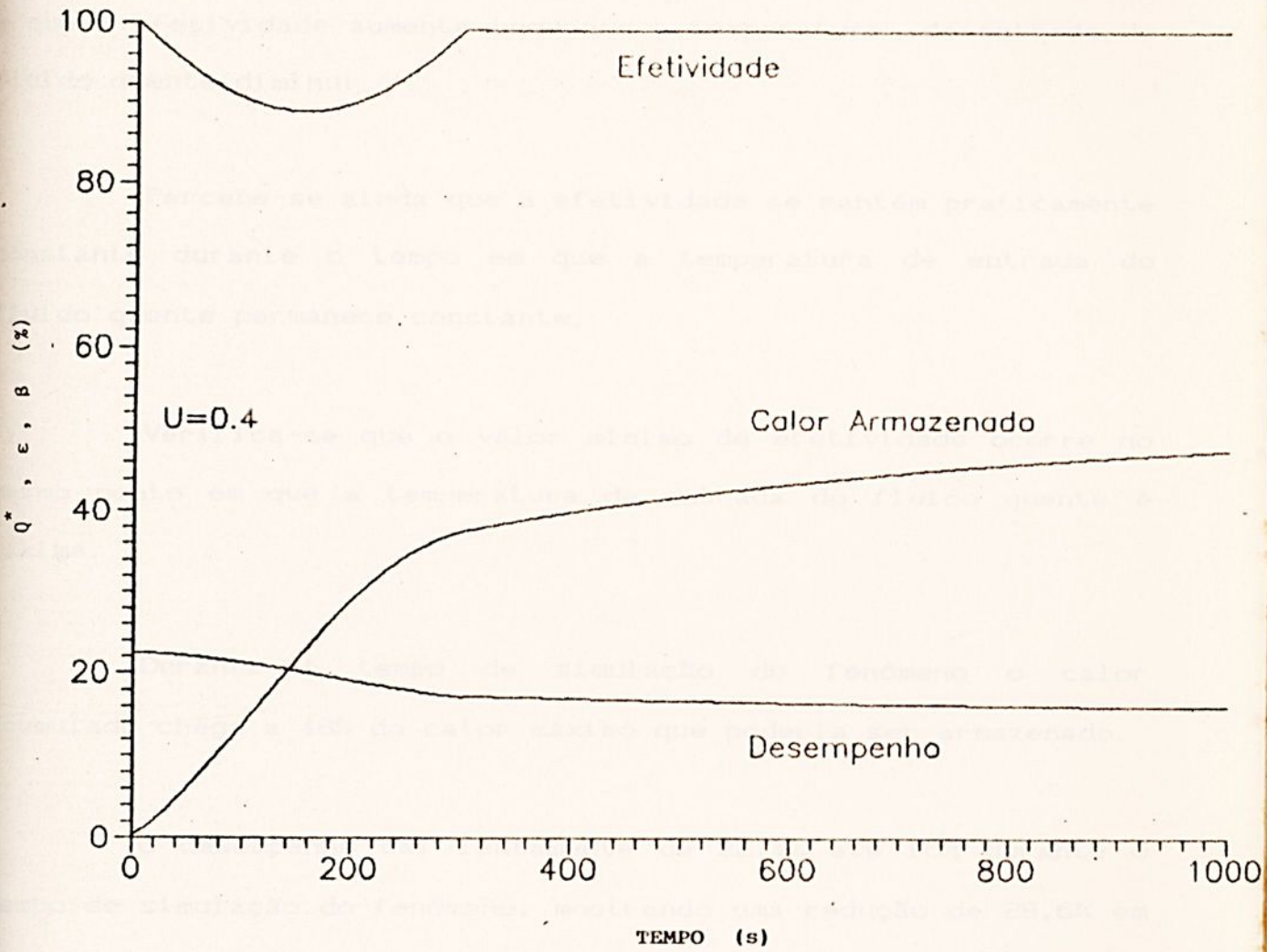


GRÁFICO 15 - CALOR ARMAZENADO, EFETIVIDADE E DESEMPENHO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MEVAR 2

5.7.1 DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS DO MEVAR 2

Como a temperatura de entrada do fluido quente é variável, (segundo uma função seno) percebe-se que a efetividade diminui enquanto a temperatura de entrada do fluido quente aumenta e que a efetividade aumenta enquanto a temperatura de entrada do fluido quente diminui.

Percebe-se ainda que a efetividade se mantém praticamente constante durante o tempo em que a temperatura de entrada do fluido quente permanece constante.

Verifica-se que o valor mínimo de efetividade ocorre no mesmo ponto em que a temperatura de entrada do fluido quente é máxima.

Durante o tempo de simulação do fenômeno o calor acumulado chega a 48% do calor máximo que poderia ser armazenado.

O desempenho cai lentamente de 22,4% até 16% durante o tempo de simulação do fenômeno, mostrando uma redução de 28,6% em relação ao valor inicial.

O comportamento do aumento das temperaturas do fluido frio e do material armazenador estão de acordo com o esperado, ressaltando-se apenas sensível mudança de inclinação das curvas imediatamente após o término do meio ciclo de variação da temperatura de entrada do fluido quente.

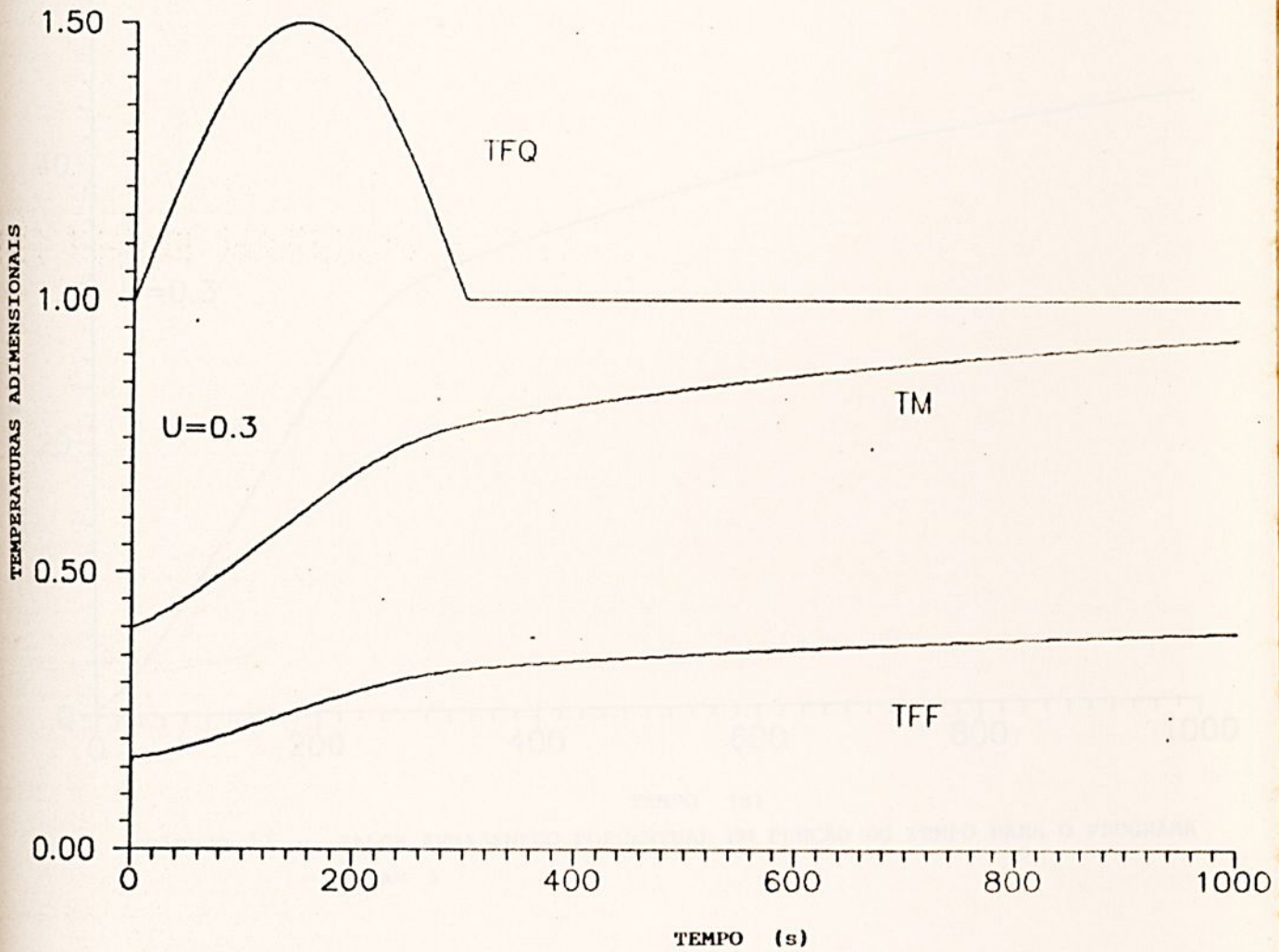


GRÁFICO 16 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA PROGRAMA MEVAR 3

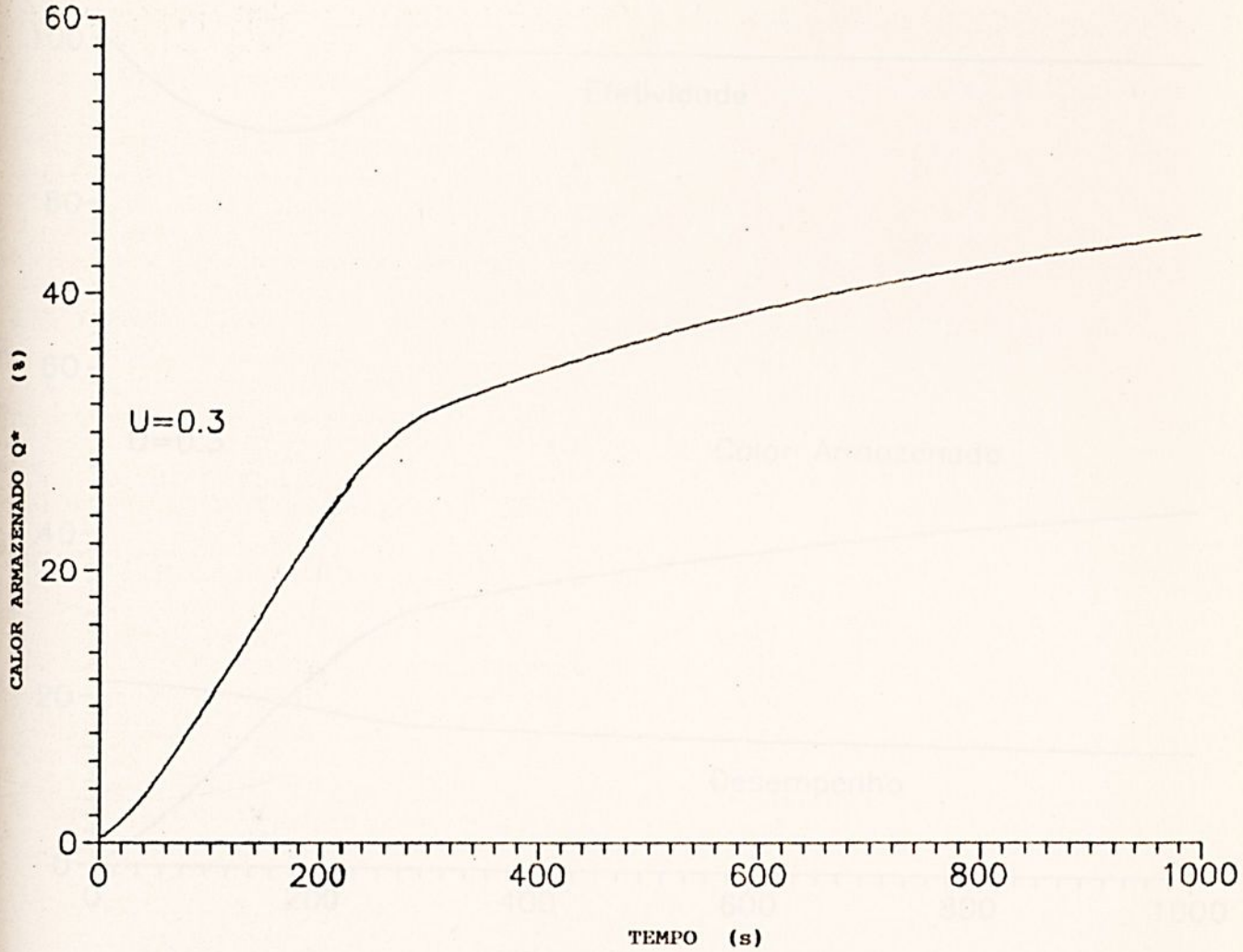


GRÁFICO 17 - CALOR ARMAZENADO PORCENTUAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MEVAR 3

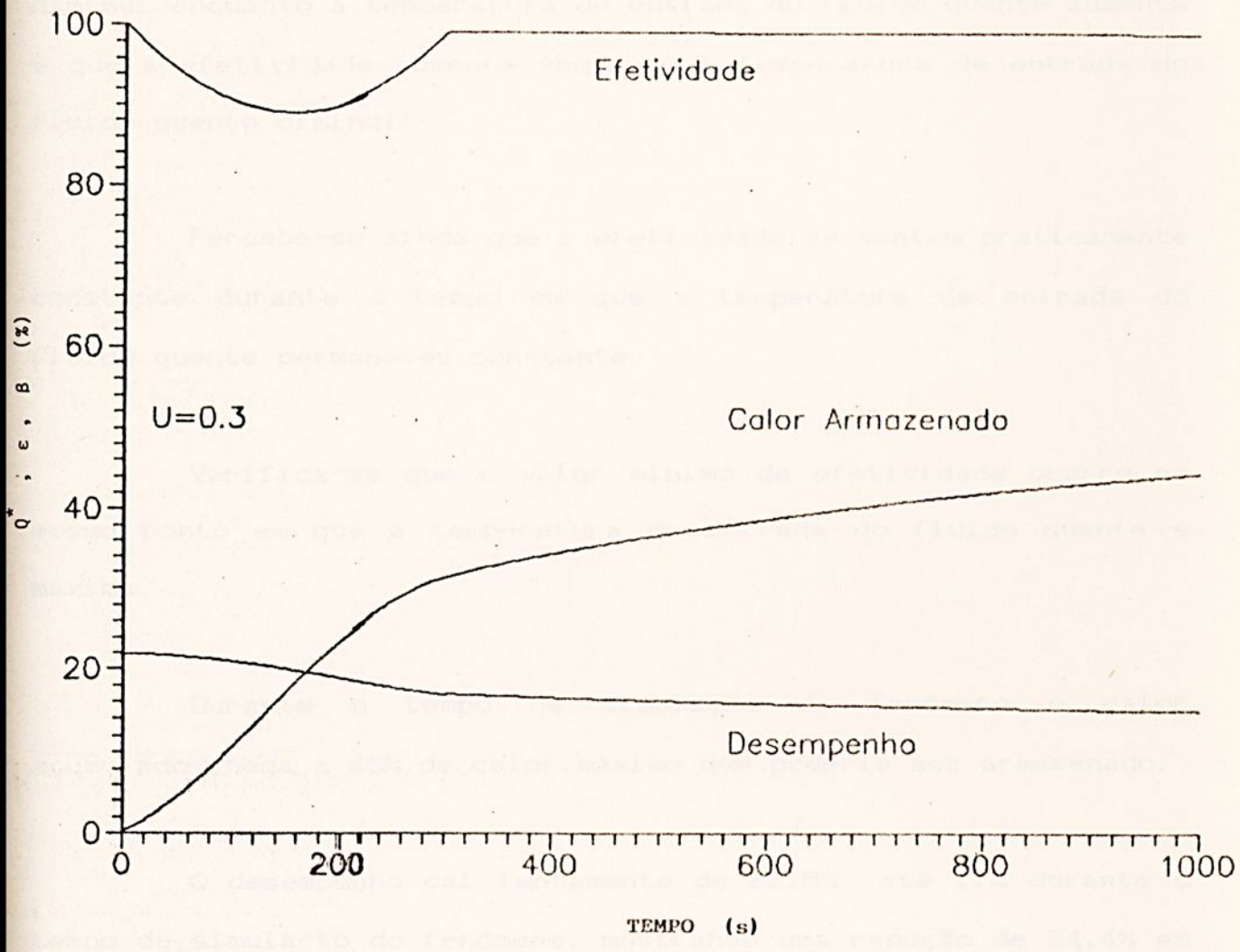


GRÁFICO 18 - CALOR ARMAZENADO, EFETIVIDADE E DESEMPENHO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROGRAMA MEVAR 3

5.8.1 DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS DO MEVAR 3

Como a temperatura de entrada do fluido quente é variável,(segundo uma função seno) percebe-se que a efetividade diminui enquanto a temperatura de entrada do fluido quente aumenta e que a efetividade aumenta enquanto a temperatura de entrada do fluido quente diminui.

Percebe-se ainda que a efetividade se mantem praticamente constante durante o tempo em que a temperatura de entrada do fluido quente permaneceu constante.

Verifica-se que o valor mínimo de efetividade ocorre no mesmo ponto em que a temperatura de entrada do fluido quente é máxima.

Durante o tempo de simulação do fenômeno o calor acumulado chega a 46% de calor máximo que poderia ser armazenado.

O desempenho cai lentamente de 22,5% até 17% durante o tempo de simulação do fenômeno, mostrando uma redução de 24,4% em relação ao valor inicial.

O comportamento do aumento das temperaturas do fluido frio e do material armazenador estão de acordo com o esperado, ressaltando-se apenas sensível mudança de inclinação das curvas imediatamente após o término do meio ciclo de variação da temperatura de entrada do fluido quente.

5.9 RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE O CALOR ARMAZENADOR

No gráfico 19 abaixo podemos verificar as curvas de calor armazenado para os valores de U=0,5; U=0,4 e U=0,3, obtidos dos programas MECONS 1, MECONS 2 e MECONS 3 respectivamente e no gráfico 20 as curvas de calor armazenado, obtidos dos programas MEVAR 1, MEVAR 2 e MEVAR 3.

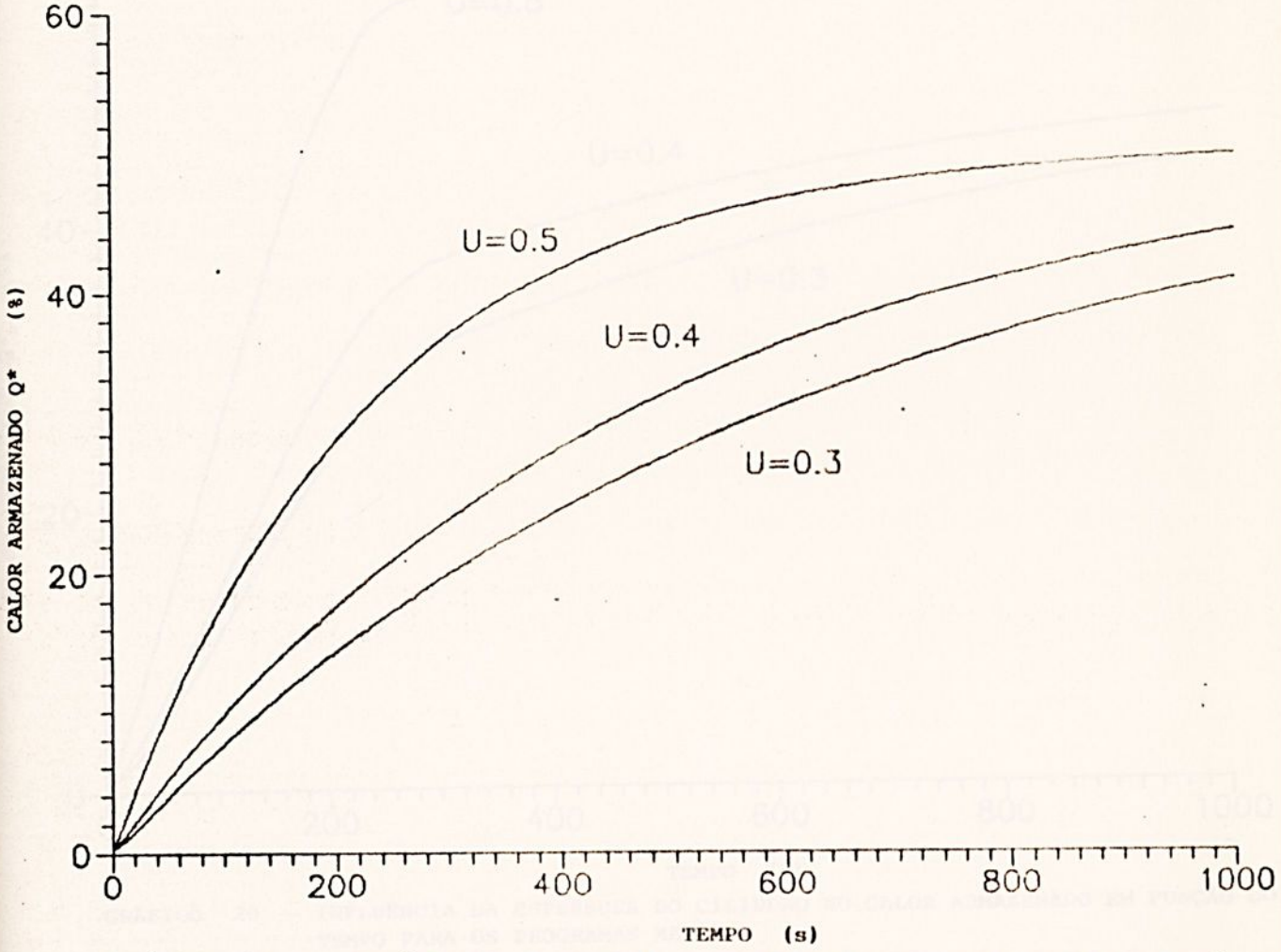


GRÁFICO 19 - INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO CILINDRO NO CALOR ARMAZENADO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS PROGRAMAS MECONS

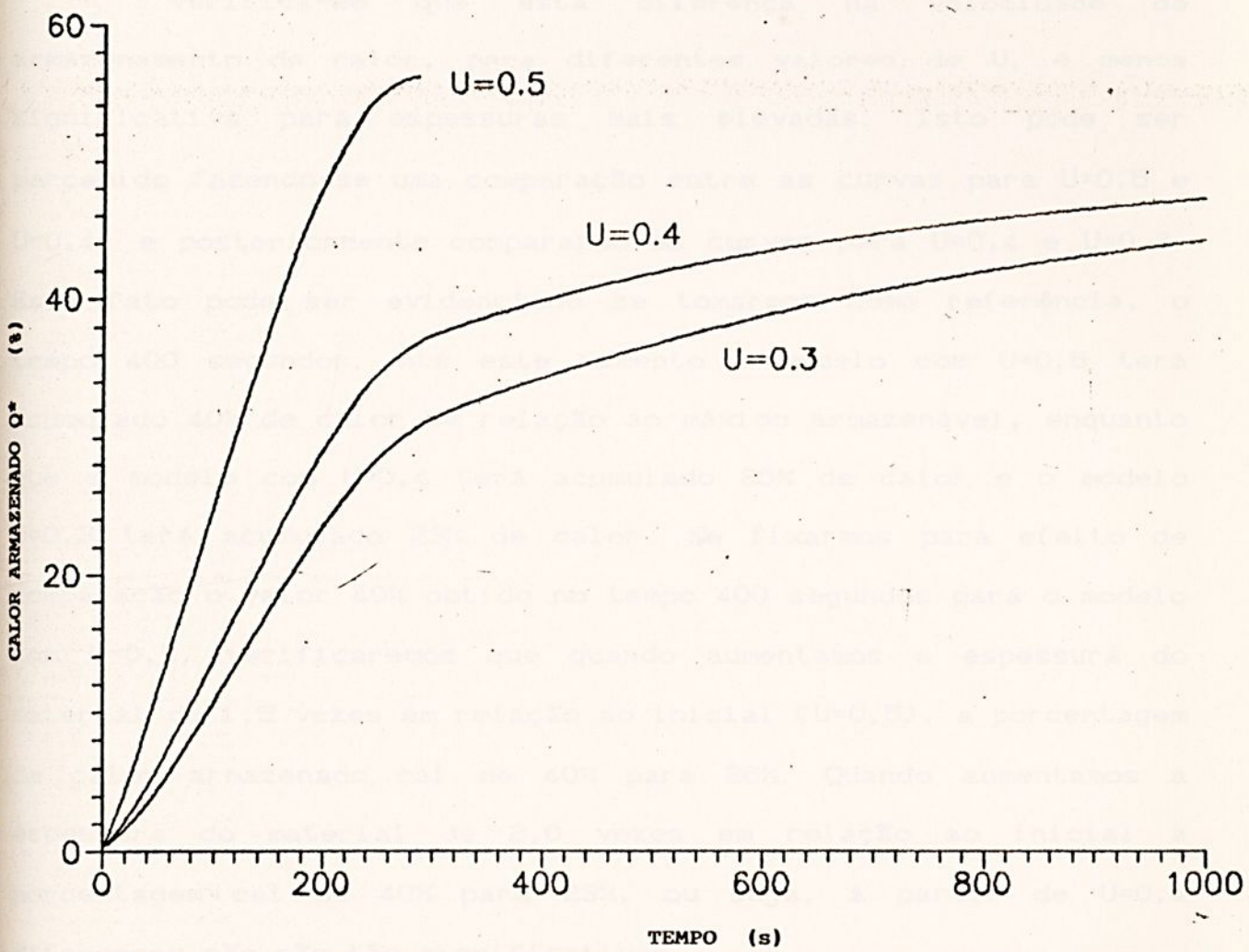


GRÁFICO 20 - INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO CILINDRO NO CALOR ARMAZENADO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS PROGRAMAS MEVAR

5.9.1 DISCUSSÕES

Pelo gráfico 19 podemos perceber que a velocidade de armazenamento de calor é maior para U=0,5 (modelo de menor espessura do cilindro) e é menor para U=0,3 (modelo de maior espessura).

Verifica-se que esta diferença na velocidade de armazenamento de calor, para diferentes valores de U, é menos significativa para espessuras mais elevadas. Isto pode ser percebido fazendo-se uma comparação entre as curvas para U=0,5 e U=0,4 e posteriormente comparando as curvas para U=0,4 e U=0,3. Este fato pode ser evidenciado se tomarmos como referência, o tempo 400 segundos. Até este momento o modelo com U=0,5 terá acumulado 40% de calor em relação ao máximo armazenável, enquanto que o modelo com U=0,4 terá acumulado 26% de calor e o modelo U=0,3 terá acumulado 23% de calor. Se fixarmos para efeito de comparação o valor 40% obtido no tempo 400 segundos para o modelo com U=0,5, verificaremos que quando aumentamos a espessura do material de 1,5 vezes em relação ao inicial (U=0,5), a porcentagem de calor armazenado cai de 40% para 26%. Quando aumentamos a espessura do material de 2,0 vezes em relação ao inicial a porcentagem cai de 40% para 23%, ou seja, à partir de U=0,4 diferenças não são tão significativas.

Pelo gráfico 20 percebemos também que a velocidade de armazenamento de calor é maior para U=0,5 e é menor para U=0,3.

Neste caso, também se verifica que a diferença na velocidade de armazenamento de calor para diversos valores de U é menos significativa para espessuras mais elevadas.

Nota-se que nas três curvas há um ponto comum entre elas, que ocorre no tempo 300 segundos, onde cada curva sofre uma mudança brusca de inclinação. Esta mudança pode ser explicada, considerando que do início da simulação até o tempo 300 segundos, a temperatura de entrada do fluido quente é variável e à partir daí passa a ser constante, devendo ser ressaltado que enquanto a temperatura de entrada do fluido quente é variável a curva do calor armazenado apresenta comportamento aproximadamente linear e à partir do momento em que a temperatura de entrada do fluido quente passa a ser constante, a curva do calor armazenado apresenta comportamento não linear

A curva para U=0,5 não teve continuidade à partir do tempo 300 segundos porque o programa MEVAR 1 interrompe os cálculos no instante em que a temperatura do material armazenador se iguala à temperatura de entrada do fluido quente , o que pode ser evidenciado no gráfico 10.

CAPÍTULO 6

Os gráficos apresentados no capítulo anterior, permitem investigar o desempenho de armazenadores térmicos por calor sensível levando-se em conta parâmetros tais como : tempo, efetividade, desempenho e temperatura.

Para os resultados obtidos, nota-se que a influencia da espessura do cilindro é marcante no tempo de armazenamento para o modelo de pertubação na temperatura de entrada do fluido quente, bem como para o modelo com temperatura de entrada do fluido quente constante.

A pertubação introduzida na temperatura de entrada do fluido quente, modifica sensivelmente o calor armazenado em função do tempo durante o período em que a pertubação está acontencendo. A partir daí é nítida a mudança de comportamento, analisando-se a inclinação das curvas nos gráficos calor versus tempo.

O modelo reproduz muito bem o comportamento das variações de temperatura do fluido quente, fluido frio e material do trocador quando comparados com aqueles disponíveis na literatura para trocadores de calor convencionais [6].

Observa-se ainda que o valor mínimo de efetividade praticamente coincide com o ponto onde a temperatura de entrada do fluido quente é máxima nos três casos estudados com U=0,5; U=0,4 e U=0,3.

A espessura do cilindro praticamente não influencia no desempenho do armazenador.

No modelo com pertubação da temperatura de entrada do fluido quente, à medida que o armazenamento e troca de calor acontecem, ocorre uma ligeira queda no desempenho, da ordem de 11 a 19% em relação ao inicial até se atingir o regime permanente. Praticamente as mesmas condições se repetem no modelo com temperatura de entrada do fluido quente constante.

Neste trabalho procurou-se dar continuidade ao estudo feito por Magalhães [19].

Para finalizar, ficam algumas sugestões para futuros trabalhos utilizando-se este modelo :

- Introdução de aletas longitudinais no trocador-armazenador.
- Testar outros materiais armazenadores
- Estudar mais detalhes sobre os efeitos de convecção durante o processo de troca e armazenamento de calor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] SCHMIDT, F. W. and JOHN A. WILLMOTT, ''Thermal Energy Storage and Regeneration'', Hemisphere Publishing Corporation - McGraw - Hill (1981).

[2] M. M. E. - SETEC ''Balanço de Energia Util'', Dez 1984.

[3] KATTAR, R. ''Armazenadores Térmicos por Calor Latente com Aletas Transversais Tipo Tubo-Carcaça'', Tese de Mestrado, ITA, Novembro (1987).

[4] MAGALHÃES FILHO P., ''Estudo Teórico e Experimental de Armazenadores de Calor Sensivel com Tubos Sólidos'', Tese de Doutorado, UNICAMP, junho (1986).

[5] SZEGO, J. and F. W. SCHIMIDT, ''Analysis of the Effects of Finite Conductivity in the Single Blow Heat Transfer Unit'', Journal of Heat Transfer, Vol. 100 (1987).

[6] OZISIK M. NECATI, ''Basic Heat Transfer'', McGraw -Hill - Kogakusha (1977).

[7] HAUSEN H., ''On the Theory of Heat Exchange in Regenerations'', Z Angew. Math. Mech., pp. 193-200 (1929).

[8] KARLSSON H. and S. HOLM, ''Heat Transfer and Fluid Resistance in Ljungstron-Type Air Pre-heaters'', Trans. ASME, Vol. 65, pp. 61-72 (1943).

[9] COPPAGE J.E. and LONDON A. L., ''The Periodic Flow Regeneration - A summary of Desing Theory'', Trans ASME VOL. 75, pp 779-787 (1953).

[10] LAMBERTSON T. J., ''Performance Factors of a Periodic Flow Heat Exchanger'', Trans ASME, Vol. 80, pp. 586-592 (1953).

[11] HARPER D. B. and ROHSENOW W. M., ''Effect of Rotary Regeneration Performance on Gas-Turbine-Plant Performance'', Trans ASME, Vol. 75, pp. 759-765 (1953).

[12] HARPER D. B., ''Seal Leakage in the Rotary Regenerator and Its Effect on Rotary Regenerator Design for Gas Turbines'', Trans ASME, Vol. 79, pp. 233-245 (1957).

[13] LONDON A. L. et Alli, ''The Transiente Responde of Gas Turbine Plant Heat Exchanger - Additional Solutions for Regenerators of the Periodic - Flow and Direct - Transfer Types'', Journal of Engineering for Power, pp. 127-135 (1964).

[14] GIBBS M.G., ''Design Criteria for Eight-hour Storage Heating Systems'' , Elec, Rev., Mar 14 (1969), pp 379.

[15] POLLAND R., ''Engineering Outline : Thermal Storage Eletrical Space Heating'', Oct.30 (1970), pp.473

[16] GOLDSTERN W., ''Steam Storage Installations'', Pergamon Press, Oxford, (1970).

[17] GIBBS M.G., ''Current Development in Storage Heaters'' Elec.Rev., Fab 5 (1971), pp 189.

[18] FIELD A.A., ''Storage Heating by Low Cost Electricity'', Heat and Piping, Feb. (1971), pp.75.

[19] GLENN D.R., ''Technical and Economic Feasibility of Thermal Energy Storage'', NTIS-CDD-2558-1, Feb.(1976)

[20] LORSCH H.G. et alli, ''Thermal Energy Storage for Heating and Air Conditioning'', Future Energy Production Systems, Vol.1, Academic Press, New York (1969), pp. 69.

[21] REAY D.A., ''Industrial Energy Conservation'', Pergamon Press, Oxford (1977).

[22] COMMITTEE and ADVANCED STORAGE SYSTEMS,'' Criteria for Energy Storage R&D'', National Academy of Science, Washington, D.C. (1976).

[23] BOELTER, L.M.K et Alli, ''Heat Transfer Notes'', McGraw-Hill, New York (1976).

[24] GROBER, H, S.ERK, and V.GRIGULL, ''Fundamentals of Heat Transfer'', MacGraw-Hill, New York (1961).

[25] SZEGO J. and F.W.SCHIMIDT, ''Transient Behavior of a Solid Sensible Heat Thermal Storage Exchanger'', Trans ASME Vol.100, pp. 148-154 (1978).

[26] SCHIMIDT, F.W.,and J.SZEGO, ''Transient Response of Solid Sensible Heat Thermal Storage Units - Single Fluid'', Journal of Heat Transfer, Vol.98 (1976).

[27] ARPACI, V.S., ''Conduction Heat Transfer'', Addison-Wesley, Publishing Company, Reading, Massachusetts (1966).

[28] KAYS, W.M. and M.E. CRAWFORD, ''Convective Heat and Mass Transfer'', 2a.ed., McGraw-Hill, New York (1980).

[29] BIRD, R.B., W.E. STEWART, e.n. LIGHTFOOT, ''Fenômenos de Transporte'', Editorial Reverté, Barcelona (1980).

[30] CARSLAW,H.S., J.C. JAEGER, ''Conduction of Heat in Solids'', 2a. ed., Oxford University Press, London (1985).

[31] CARNAHAN, B., H. A. LUTHER, and J.O.Wilks, ''Applied Numerical Methods'', John Wiley & Sons, New York (1969).

[32] SMITH, G.D., ''Numerical Solution of Differencial Equations'', Oxford University Press, London (1965).

[33] RICHTMEYER, R.D. ''Difference Methods for Initial Value Problems'', Interscience Publishers, Inc, New York, (1957).

[34] OZISIK, M.N. ''Boudary Value Problems of Heat Conduction'', International Textbook Campany, Scraton, Pensylvania (1968).

[35] SIEDER, E.N., e C.E.Tate. ''Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubs'' Ind.Eng.Chem., Vol. 28 (1936).

[36] HAUSEN, H.''Darstellung des Warmeuberganges in Rohrendurch Veraligemeinerte Potenzbeziehungen'', Z. VDI. Beih Verfarenstech. 4, (1943).

[37] HILL, J.E., G.E. KELLY, e B.A.Peavy. ''A Methods of Testing for Reating Thermal Storage Derives Based on Thermal Performance'', Solar Energy, Vol.19 (1977).

APÊNDICE A

```
type meconsi.for
C1234567890.........2.........3.........4.........5.........6.........7.........

      implicit double precision (a-h,o-z)
      DIMENSION TM1(13,11),TM(13,11),TFF1(12),TFF(12),QPE(200),
     *  HI1(12),CF1(12),TBFQ(12),TBFF(12),TMXR(12,12),
     *  CP(12),PR(12),DF(12),STMXR(12),STM(12),VT(12),Q(10040),
     *  TFQN(12),TFQ(12),TPF(12),TPQ(12),REFF(12),REFQ(12),DFFQ(12),
     *  HIFF1(12),HIFQ1(12),RE(12),TBF(12),TP(12),TF(12),CPFQ(12),
     *  CPFF(12),PRFF(12),PRFQ(12),CFFQ1(12),CFFF1(12),DFFF(12)

      REAL NU(12),KF(12),NI(12),MIF(12),MIFP(12),KT(12,12),NUFQ(12)
      REAL KFF(12),KFQ(12),NUFF(12)
      open(unit=1,file='arqporc1.dat',status='new')
      open(unit=2,file='arqtemc1.dat',status='new')
      open(unit=3,file='arqcalc1.dat',status='new')
C.....
C
C           PROGRAMA    MECONS1
C.....
.........................

C...  LISTA  DE  VARIAVEIS
C
C     RI      : Raio interno do tubo (m)
C     RO      : Raio externo do tubo (m)
C     XL      : Comprimento do tubo  (m)
C     CM      : Calor especifico do material (kJ/kg*C)
C     AKM     : Condutividade termica do material (kJ/s*m*C)
C     DM      : Densidade do material (kg/m**3)
C     CPFF    : Calor especifico do fluido frio (kJ/kg*C)
C     CPFQ    : Calor especifico do fluido quente (kJ/kg*C)
C     HIF     : Coeficiente de conveccao interno (kW/m**2*C)
C     HIQ     : Coeficiente de conveccao externo (kW/m**2*C)
C     VFF     : Velocidade do fluido frio (m/s)
C     VFQ     : Velocidade do fluido quente (m/s)
C     CFF     : Valor inicial do calor especifico do fluido frio (kJ/kg*C)
C     CFQ     : Valor inicial do calor especifico do fluido quente(kJ/kg*C)
C     AMFF    : Massa do fluido frio escoando  (kg/s)
C     AMFQ    : Massa do fluido quente escoando (kg/s)
C     TFF     : Temperatura do fluido frio (K)
C     TFQ     : Temperatura do fluido quente (K)
C     TM      : Temperatura do material (K)
C     TFFI    : Temperatura do fluido frio na entrada do tubo no tempo zero (K)
C     TFQI    : Temperatura do fluido quente na entrada do tubo no tempo zero(K)
C     TO      : Temperatura do material no tempo zero (K)
C     TI      : Intervalo de tempo entre a impressao de duas tabelas (s)
C     TFI     : Tempo final de impressao (s)
C     DT      : Incremento de tempo (s)
C     M       : Numero de estacoes no comprimento do tubo
C     N       : Numero de divisoes do raio do tubo
C     TPF     : Temperatura da parede fria (K)
C     TPQ     : Temperatura da parede quente(K)
C     REFF    : Reynolds do fluido frio
C     REFQ    : Reynolds do fluido quente
C     DFFQ    : Diferenca de temperatura do fluido quente (K)
C     DTFF    : Diferenca de temperatura do fluido frio (K)
C
C.....
C
C...   DADOS DE ENTRADA
C
       DATA RI,RO,XL,AMFF,AMFQ,CFF,CFQ,CM,AKM,DM/.014,.028,1.08,.000164,
     *.0005,4180.7,1833.7,.465,.054,7840./
C
```

```
C
      HIF=.595
      HIQ=.637
      VF=.796
      VQ=.796
      TFFI=283.
      TFQmax=433.
      TFQI=383.
      TO=323.
      TD=(TFQI-TO)+(TO-TFFI)
      AUXFI=4.*AMFF/(6.28*RI)
      AUXFQ=4.*AMFQ/(6.28*RO)
      TI=5.0
      TFI=25000.
      DT=.1
      M=11
      N=11
      kont=80
      a=.5
      p=600.
      w=6.2832/p
      ANX=FLOAT(M)
      ANR=FLOAT(N)
      L=2
      NT=10000
      TR=0.
      TFF1(1)=0.
      TFF(1)=0.
      TFQN(1)=1.
      TFQ(1)=1.
      S2=RO-RI
      S=ANR-1.
      ALFA=AKM/(CM*DM)
      S1=((S**2)*ALFA)/(2.*S2)
      QMAX=DM*CM*3.1416*(RO**2-RI**2)*XL*TD
      write(*,*)'          qmax= ',qmax
      DQSFF=6.28*RO*HIF*XL/(AMFF*CFF*(ANX-1.))
      DQSFQ=6.28*RI*HIQ*XL/(AMFQ*CFQ*(ANX-1.))
      U=RI/RO
      AFF=(((ANX-1.)/XL)**2)*ALFA
      AFQ=(((ANX-1.)/XL)**2)*ALFA
      BFF=(((ANR-1.)/(RO-RI))**2)*ALFA
      BFQ=(((ANR-1.)/(RO-RI))**2)*ALFA
C     CFF=(HIF*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
C      CFQ=(HIQ*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
      WRITE(*,3)DQSff,ALFA,U,Aff,Bff,Cff
      write (*,3)DQSfq,ALFA,u,afq,bfq,cfq
C
C...  DISTRIBUICAO E IMPRESSAO DA TEMPERATURA INICIAL
C
      WRITE(*,13)TR
      WRITE(*,33)(LX,LX=1,N)
      DO 10 I=1,M
      tff(i+1)=0.
      tfq(i)=1.
      DO 11 J=1,N
      TM(I,J)=0.4
11    CONTINUE
      WRITE(*,23)I,TFq(I),(TM(I,JX),JX=1,N),TFf(I)
10    CONTINUE
C
C...  MONTAGEM DAS TABELAS
C
      DO 20 KK=1,NT
      XKK=FLOAT(KK)
      TR=XKK*TI
```

000817

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

```
      WRITE(*,13)TR
      WRITE(*,33)(LL,LL=1,N)
      DO 30 K=1,L
      DO 40 J=1,N
      IF(J.EQ.N)GOTO 19
      IF(J.NE.1)GOTO 29
C
C...  CALCULO DA TEMP. DO MATERIAL E DO LADO INTERNO ( Fluido Quente )
C
      if(tfq(2).le.tm(2,1))stop
      TM(M+1,1)=TM(M,1)
      TM(M+2,1)=TM(M,1)
      CALL HC(AMFQ,RI,TFQ,TM,TD,TO,XL,AUXFQ,M,N,TBFQ,TPQ,
     *  REFQ,NUFQ,HIFQ1,CPFQ,KFQ,PRFQ,CFFQ1,DFFQ)
      DO 50 I=1,M
      CTFQ=(HIFQ1(I)*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
      TM1(I,J)=TM(I,J)+DT*ABS(AFQ*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+TM
     *  (I+2,J))+BFQ*(TM(I,J+2)-2.*TM(I,J+1)+TM(I,J))-CTFQ*
     *  (TFQ(I)-TM(I,J)))
      DQSQ1=6.28*RI*HIQ*XL/(AMFQ*CFFQ1(I)*(ANX-1.))
      TFQN(I+1)=DQSQ1*(TM1(I,J)-TFQ(I))+TFQ(I)
50    CONTINUE
      GO TO 40
C
C...  DISTRIBUICAO DE TEMPERATURA DENTRO DO MATERIAL
C
29    XJ=FLOAT(J-1)
      D=S1/(RI*S+S2*XJ)
      TM(M+1,J)=TM(M,J)
      TM(M+2,J)=TM(M,J)
      DO 60 I=1,M
            absolu = ABS(AFQ*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+
     *  TM(I+2,J))+BFQ*(TM(I,J+1)-2.*TM(I,J)+TM(I,J-1))
     *  +D*(TM(I,J+1)-TM(I,J-1)))
      TM1(I,J) = TM(I,J) + DT * absolu
60    continue
      GO TO 40
C
C...  CALCULO DA TEMPERATURA DO LADO EXTERNO ( Fluido Frio )
C
19    TM(M+1,J)=TM(M,N)
      TM(M+2,J)=TM(M,N)
      CALL HC(AMFF,RO,TFF,TM,TD,TO,XL,AUXFF,M,N,TBFF,TPF,
     *  REFF,NUFF,HIFF1,CPFF,KFF,PRFF,CFFF1,DFFF)
      DO 140 I=M,1,-1
         CTF=(HIFF1(I)*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
         TM1(I,J)=TM(I,J)+DT*ABS(AFF*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+TM
     *              (I+2,J))+BFF*(TM(I,J)-2.*TM(I,J-1)+TM(I,J-2))-CTF*
     *              (TFF(I)-TM(I,J)))
         DQSF1=6.28*RO*HIF*XL/(AMFF*CFFF1(I)*(ANX-1.))
        TFF1(I-1)=DQSF1*(TM1(I,J)-TFF(I))+TFF(I)
 140  CONTINUE
40    CONTINUE
 30    continue
      DO 230 K=1,L
      CALL CALOR(TD,TO,N,XL,RI,S2,S,TM1,ANX,DM,CM,M,QPX)
      QPE(K)=QPX
230   CONTINUE
      SOMATM=0.
      DO 130 I=1,M
      TFF(I)=TFf1(I)
      TFQ(I)=TFqN(I)
            DO 130 J=1,N
      TM(I,J)=TM1(I,J)
      SOMATM=SOMATM+TM(I,J)
130   CONTINUE
```

```
        TMMED=SOMATM/121
C
C...    CALCULO DO DESEMPENHO
C
        if(KK.ge.8)then
        QFFQ=AMFQ*CFQ*((TFQ(1)-TFQ(11))*TD+TFFI)
        QRFF=AMFF*CFF*((TFF(1)-TFF(11))*TD+TFFI)
        QTAX=AMFF*CFF*((TFQ(1)-TFF(11))*TD+TFFI)
        DES=ABS((QFFQ-QRFF)/QFFQ)*100
        EFE=ABS(QFFQ*100/QTAX)
        endif
C
C...    CALCULO DO CALOR ARMAZENADO
C
        Q(KK)=QPE(L)*100./QMAX
C
        zkk=kk*dt
        IF(KK.LE.40.OR.KK.GT.9960) THEN
          WRITE(1,888)ZKK,Q(KK),EFE,DES
          write(2,999)ZKK,TFF(1),TFQ(1),TMMED
          write(3,777)ZKK,Q(KK)
        ELSE
         IF(KK.EQ.KONT) THEN
          WRITE(1,888)ZKK,Q(KK),EFE,DES
          write(2,999)ZKK,TFF(1),TFQ(1),TMMED
          write(3,777)ZKK,Q(KK)
          KONT=KONT+40
         ENDIF
        ENDIF
C
C....   IMPRESSAO DOS RESULTADOS
c
        write(*,*)kk
        DO 90 I=1,M
        WRITE(*,23)I,TFQ(I),(TM(I,JZ),JZ=1,N),TFF(I)
90      CONTINUE
        WRITE(*,43)Q(KK)
        WRITE(*,63)des
        write(*,73)efe
        write(*,83)TMmed
20      CONTINUE
3       FORMAT(3X,'DQS=',2X,F15.8,/3X,'ALFA',2X,F15.8,
     */3X,'U=',2X,F15.8,/3X,'A=',2X,F15.8,/3X,'B=',2X
     *,F15.8,/3X,'C=',2X,F15.8,/)
13      FORMAT(////7X,'NO INSTANTE=',2X,F9.3,1X,'SEG',
     *///40X,'TEMPERATURA DO MATERIAL',/)
C
23      FORMAT(1X,I2,2X,F6.4,3X,11(F6.4),3X,F6.4)
33      FORMAT(//8X,'TFQ',7X,11(I2,4X),2X,'TFF')
43      FORMAT(//3X,'CALOR ARMAZENADO=',F10.4)
C
53      FORMAT(3X,I2,2X,5(E9.3))
63      FORMAT(6X,'DESEMPENHO=',F11.4)
73      FORMAT(8X,'EFETIVIDADE=',F11.4)
83      FORMAT(10X,'TMmed=',F11.4)
999     FORMAT(1X,F10.4,3(1X,F6.4))
888     format(1x,f10.4,3(1x,f10.4))
777     format(1x,f10.4,1x,f10.4)
        STOP
        END
C.........................
C...    SUBROTINA  HC
C
        SUBROUTINE HC(AMF,RI,TF,TM,TD,TO,XL,AUX,M,N,
     *  TBF,TP,RE,NU,HI1,CP,KF,PR,CF1,DF)
        implicit double precision (a-h,o-z)
```

```
      REAL NI(12),MIFP(12),MIF(12),KF(12),NU(12)
      DIMENSION TFX(12),TMXR(12,12),TBF(12),TP(12),
     *  RE(12),HI1(12),CP(12),PR(12),CF1(12),DF(12),TF(12),TM(12,1)
      TFFI=283.
      DO 10 II=1,M
      TFX(II)=TF(II)*TD+TFFI
      TMXR(II,1)=TM(II,1)*TD+TFFI
10    CONTINUE
      TFX(M+1)=TFX(M)
      TMXR(M+1,1)=TMXR(M,1)
      DO 20 II=1,M
      TBF(II)=(TFX(II)+TFX(II+1))/2.
      TP(II)=(TMXR(II,1)+TMXR(II+1,1))/2.
      NI(II)=(72.72-1.135*TBF(II)+.646E-2*TBF(II)**2.)*1.E-6
      RE(II)=AUX/NI(II)
      MIFP(II)=(.06836-.1053E-2*TP(II)+.4104E-5*TP(II)**2)
      MIF(II)=(.06836-.1053E-2*TBF(II)+.4101E-5*TBF(II)**2)
      CP(II)=1.838+.003699*TBF(II)
      DF(II)= 903.-.6706*TBF(II)
      KF(II)=(.1394-.9661E-4*TBF(II))*1.E-3
      CF1(II)=CP(II)*DF(II)
      PR(II)=CP(II)*MIF(II)/KF(II)
      zzz=re(ii)*pr(ii)
      Z1=zzz**.333
      Z2=(2.*RI/XL)**.333
      Z3=(MIF(II)/MIFP(II))**.14
      NU(II)=7.2*Z1*Z2*Z3
      HI1(II)=NU(II)*KF(II)/(2.*RI)
20    CONTINUE
      RETURN
      END
C.........................
C...   SUBROTINA CALOR
C
      SUBROUTINE CALOR(TD,TO,N,XL,RI,S2,S,TM1,ANX,DM,CM,M,QPX)
      implicit double precision (a-h,o-z)
      DIMENSION VT(12),STMXR(12),TM1(12,12),STM(12),QP(13)
      REAL KT(12,12)
      TFFI=283.
C      to=321.
      DO 10 JA=1,N
      DO 10 II=1,M
      KT(II,JA)=TM1(II,JA)*TD+TFFI
C      write(*,*)'kt=',kt(ii,ja)
10    CONTINUE
      NN=N-1
      VT(1)=XL*3.1416*((RI+S2/S)**2-RI**2)
      DO 700 JC=2,NN
      KJC=JC-1
      XJC=FLOAT(KJC)
      XIJ=FLOAT(JC)
      VT(JC)=XL*3.1416*((RI+XIJ*S2/S)**2-(RI+XJC*S2/S)**2)
700   CONTINUE
      DO 710 JC=1,N
      STMXR(JC)=80.
      DO 710 IC=1,M
      STMXR(JC)=KT(IC,JC)+STMXR(JC)
710   CONTINUE
C      STM(1)=TO
      STM(1)=(STMXR(1)+STMXR(2))/(2.*ANX)
      QP(1)=VT(1)*ABS(STM(1)-TO)*DM*CM
C      write(*,*)'stm(1)=',stm(1) ,   'qp(1)=',qp(1)
C      QP(1)=0.
      DO 720 JC=2,NN
      STM(JC)=(STMXR(JC)+STMXR(JC+1))/(2.*ANX)
      QP(JC)=VT(JC)*ABS(STM(JC)-TO)*DM*CM+QP(JC-1)
```

```
720     CONTINUE
        QPX=QP(NN)
        RETURN
        END

C:\FORTRAN>
```

```
C1234567890.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....
      implicit double precision (a-h,o-z)
      DIMENSION TM1(13,11),TM(13,11),TFFI(12),TFF(12),QPE(200),
     *  HI1(12),CF1(12),TBFQ(12),TBFF(12),TMXR(12,12),
     *  CP(12),PR(12),DF(12),STMXR(12),STM(12),VT(12),Q(10040),
     *  TFQN(12),TFQ(12),TPF(12),TPQ(12),REFF(12),REFQ(12),DFFQ(12),
     *  HIFF1(12),HIFQ1(12),RE(12),TBF(12),TP(12),TF(12),CPFQ(12),
     *  CPFF(12),PRFF(12),PRFQ(12),CFFQ1(12),CFFF1(12),DFFF(12)

      REAL NU(12),KF(12),NI(12),MIF(12),MIFP(12),KT(12,12),NUFQ(12)
      REAL KFF(12),KFQ(12),NUFF(12)
      open(unit=1,file='arqporc2.dat',status='new')
      open(unit=2,file='arqtemc2.dat',status='new')
      open(unit=3,file='arqcalc2.dat',status='new')
C.....
C
C            PROGRAMA     MECONS2
C.....
C
C...  LISTA  DE  VARIAVEIS
C
C     RI      : Raio interno do tubo (m)
C     RO      : Raio externo do tubo (m)
C     XL      : Comprimento do tubo  (m)
C     CM      : Calor especifico do material (kj/kg*c)
C     AKM     : Condutividade termica do material (kj/s*m*c)
C     DM      : Densidade do material (kg/m**3)
C     CPFF    : Calor especifico do fluido frio (kj/kg*c)
C     CPFQ    : Calor especifico do fluido quente (kj/kg*c)
C     HIF     : Coeficiente de conveccao interno  (kw/m**2*c)
C     HIQ     : Coeficiente de conveccao externo  (kw/m**2*c)
C     VFF     : Velocidade do fluido frio (m/s)
C     VFQ     : Velocidade do fluido quente (m/s)
C     CFF     : Valor inicial do calor especifico do fluido frio (kj/kg*c)
C     CFQ     : Valor inicial do calor especifico do fluido quente(kj/kg*c)
C     AMFF    : Massa do fluido frio escoando  (kg/s)
C     AMFQ    : Massa do fluido quente escoando (kg/s)
C     TFF     : Temperatura do fluido frio  (K)
C     TFQ     : Temperatura do fluido quente  (K)
C     TM      : Temperatura do material   (K)
C     TFFI    : Temperatura do fluido frio   na entrada do tubo no tempo zero (K)
C     TFQI    : Temperatura do fluido quente na entrada do tubo no tempo zero (K)
C     TO      : Temperatura do material no tempo zero (K)
C     TI      : Intervalo de tempo entre a impressao de duas tabelas (s)
C     TFI     : Tempo final de impressao (s)
C     DT      : Incremento de tempo (s)
C     M       : Numero de estacoes no comprimento do tubo
C     N       : Numero de divisoes do raio do tubo
C     TPF     : Temperatura da parede fria  (K)
C     TPQ     : Temperatura da parede quente (K)
C     REFF    : Reynolds do fluido frio
C     REFQ    : Reynolds do fluido quente
C     DFFQ    : Diferenca de temperatura do fluido quente (K)
C     DTFF    : Diferenca de temperatura do fluido frio  (K)
C
C.....
C
C...   DADOS DE ENTRADA
C
       DATA RI,RO,XL,AMFF,AMFQ,CFF,CFQ,DM,AKM,DM/.014,.035,1.05,.0005,
     *.0005,4180.7,1833.7,.465,.054,7840./
C
       END=EOF
```

```
C
      HIF=.595
      HIQ=.637
      VF=.796
      VQ=.796
      TFFI=283.
      TFQmax=433.
      TFQI=383.
      TO=323.
      TD=(TFQI-TO)+(TO-TFFI)
      AUXFI=4.*AMFF/(6.28*RI)
      AUXFQ=4.*AMFQ/(6.28*RO)
      TI=5.0
      TFI=25000.
      DT=.1
      M=11
      N=11
      kont=80
      a=.5
      p=600.
      w=6.2832/p
      ANX=FLOAT(M)
      ANR=FLOAT(N)
      L=2
      NT=10000
      TR=0.
      TFF1(1)=0.
      TFF(1)=0.
      TFQN(1)=1.
      TFQ(1)=1.
      S2=RO-RI
      S=ANR-1.
      ALFA=AKM/(CM*DM)
      S1=((S**2)*ALFA)/(2.*S2)
      QMAX=DM*CM*3.1416*(RO**2-RI**2)*XL*TD
      write(*,*)'          qmax= ',qmax
      DQSFF=6.28*RO*HIF*XL/(AMFF*CFF*(ANX-1.))
      DQSFQ=6.28*RI*HIQ*XL/(AMFQ*CFQ*(ANX-1.))
      U=RI/RO
      AFF=(((ANX-1.)/XL)**2)*ALFA
      AFQ=(((ANX-1.)/XL)**2)*ALFA
      BFF=(((ANR-1.)/(RO-RI))**2)*ALFA
      BFQ=(((ANR-1.)/(RO-RI))**2)*ALFA
C     CFF=(HIF*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
C      CFQ=(HIQ*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
      WRITE(*,3)DQSff,ALFA,U,Aff,Bff,Cff
      write (*,3)DQSfq,ALFA,u,afq,bfq,cfq
C
C...  DISTRIBUICAO E IMPRESSAO DA TEMPERATURA INICIAL
C
      WRITE(*,13)TR
      WRITE(*,33)(LX,LX=1,N)
      DO 10 I=1,M
      tff(I+1)=0.
      tfq(I)=1.
      DO 11 J=1,N
      TM(I,J)=0.4
11    CONTINUE
      WRITE(*,23)I,TFq(I),(TM(I,JX),JX=1,N),TFf(I)
10    CONTINUE
C
C...  MONTAGEM DAS TABELAS
C
      DO 20 KK=1,NT
      XKK=FLOAT(KK)
      TR=XKK*TI
```

```
      WRITE(*,13)TR
      WRITE(*,33)(LL,LL=1,N)
      DO 30 K=1,L
      DO 40 J=1,N
      IF(J.EQ.N)GOTO 19
      IF(J.NE.1)GOTO 29
C
C...  CALCULO DA TEMP. DO MATERIAL E DO LADO INTERNO ( Fluido Quente )
C
      If(tfq(2).le.tm(2,1))stop
      TM(M+1,1)=TM(M,1)
      TM(M+2,1)=TM(M,1)
      CALL HC(AMFQ,RI,TFQ,TM,TD,TO,XL,AUXFQ,M,N,TBFQ,TPQ,
     *  REFQ,NUFQ,HIFQ1,CPFQ,KFQ,PRFQ,CFFQ1,DFFQ)
      DO 50 I=1,M
      CTFQ=(HIFQ1(I)*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
      TM1(I,J)=TM(I,J)+DT*ABS(AFQ*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+TM
     *  (I+2,J))+BFQ*(TM(I,J+2)-2.*TM(I,J+1)+TM(I,J))-CTFQ*
     *  (TFQ(I)-TM(I,J)))
      DQSQ1=6.28*RI*HIQ*XL/(AMFQ*CFFQ1(I)*(ANX-1.))
      TFQN(I+1)=DQSQ1*(TM1(I,J)-TFQ(I))+TFQ(I)
50    CONTINUE
      GO TO 40
C
C...  DISTRIBUICAO DE TEMPERATURA DENTRO DO MATERIAL
C
29    XJ=FLOAT(J-1)
      D=S1/(RI*S+S2*XJ)
      TM(M+1,J)=TM(M,J)
      TM(M+2,J)=TM(M,J)
      DO 60 I=1,M
            absolu = ABS(AFQ*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+
     *  TM(I+2,J))+BFQ*(TM(I,J+1)-2.*TM(I,J)+TM(I,J-1))
     *  +D*(TM(I,J+1)-TM(I,J-1)))
      TM1(I,J) = TM(I,J) + DT * absolu
60    continue
      GO TO 40
C
C...  CALCULO DA TEMPERATURA DO LADO EXTERNO ( Fluido Frio )
C
19    TM(M+1,J)=TM(M,N)
      TM(M+2,J)=TM(M,N)
      CALL HC(AMFF,RO,TFF,TM,TD,TO,XL,AUXFF,M,N,TBFF,TPF,
     *  REFF,NUFF,HIFF1,CPFF,KFF,PRFF,CFFF1,DFFF)
      DO 140 I=M,1,-1
         CTF=(HIFF1(I)*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
         TM1(I,J)=TM(I,J)+DT*ABS(AFF*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+TM
     *              (I+2,J))+BFF*(TM(I,J)-2.*TM(I,J-1)+TM(I,J-2))-CTF*
     *              (TFF(I)-TM(I,J)))
         DQSF1=6.28*RO*HIF*XL/(AMFF*CFFF1(I)*(ANX-1.))
        TFF1(I-1)=DQSF1*(TM1(I,J)-TFF(I))+TFF(I)
 140  CONTINUE
40    CONTINUE
 30    continue
      DO 230 K=1,L
      CALL CALOR(TD,TO,N,XL,RI,S2,S,TM1,ANX,DM,CM,M,QPX)
      QPE(K)=QPX
230   CONTINUE
      SOMATM=0.
      DO 130 I=1,M
      TFF(I)=TFf1(I)
      TFQ(I)=TFqN(I)
            DO 130 J=1,N
         TM(I,J)=TM1(I,J)
      SOMATM=SOMATM+TM(I,J)
130   CONTINUE
```

```
100     CONTINUE
        TMMED=SOMATM/121
C
C...    CALCULO DO DESEMPENHO
C
        If(KK.ge.8)then
        QFFQ=AMFQ*CFQ*((TFQ(1)-TFQ(11))*TD+TFFI)
        QRFF=AMFF*CFF*((TFF(1)-TFF(11))*TD+TFFI)
        QTAX=AMFF*CFF*((TFQ(1)-TFF(11))*TD+TFFI)
        DES=ABS((QFFQ-QRFF)/QFFQ)*100
        EFE=ABS(QFFQ*100/QTAX)
        endif
C
C...    CALCULO DO CALOR ARMAZENADO
C
        Q(KK)=QPE(L)*100./QMAX
C
        zkk=kk*dt
        IF(KK.LE.40.OR.KK.GT.9960) THEN
          WRITE(1,888)ZKK,Q(KK),EFE,DES
          write(2,999)ZKK,TFF(1),TFQ(1),TMMED
          write(3,777)ZKK,Q(KK)
        ELSE
         IF(KK.EQ.KONT) THEN
          WRITE(1,888)ZKK,Q(KK),EFE,DES
          write(2,999)ZKK,TFF(1),TFQ(1),TMMED
          write(3,777)ZKK,Q(KK)
          KONT=KONT+40
         ENDIF
        ENDIF
C
C....   IMPRESSAO DOS RESULTADOS
c
        write(*,*)kk
        DO 90 I=1,M
        WRITE(*,23)I,TFQ(I),(TM(I,JZ),JZ=1,N),TFF(I)
90      CONTINUE
        WRITE(*,43)Q(KK)
        WRITE(*,63)des
        write(*,73)efe
        write(*,83)TMmed
20      CONTINUE
3       FORMAT(3X,'DQS=',2X,F15.8,/3X,'ALFA',2X,F15.8,
     */3X,'U=',2X,F15.8,/3X,'A=',2X,F15.8,/3X,'B=',2X
     *,F15.8,/3X,'C=',2X,F15.8,/)
13      FORMAT(////7X,'NO INSTANTE=',2X,F9.3,1X,'SEG',
     */////40X,'TEMPERATURA DO MATERIAL',/)
C
23      FORMAT(1X,I2,2X,F6.4,3X,11(F6.4),3X,F6.4)
33      FORMAT(//8X,'TFQ',7X,11(I2,4X),2X,'TFF')
43      FORMAT(//3X,'CALOR ARMAZENADO=',F10.4)
C
53      FORMAT(3X,I2,2X,5(E9.3))
63      FORMAT(6X,'DESEMPENHO=',F11.4)
73      FORMAT(8X,'EFETIVIDADE=',F11.4)
83      FORMAT(10X,'TMmed=',F11.4)
999     FORMAT(1X,F10.4,3(1X,F6.4))
888     format(1x,f10.4,3(1x,f10.4))
777     format(1x,f10.4,1x,f10.4)
        STOP
        END
C.........................
C...    SUBROTINA  HC
C
        SUBROUTINE HC(AMF,RI,TF,TM,TD,TO,XL,AUX,M,N,
     *  TBF,TP,RE,NU,HI1,CP,KF,PR,CF1,DF)
        implicit double precision (a-h,o-z)
```

```
      implicit double precision (a-h,o-z)
      REAL NI(12),MIFP(12),MIF(12),KF(12),NU(12)
      DIMENSION TFX(12),TMXR(12,12),TBF(12),TP(12),
     *  RE(12),HI1(12),CP(12),PR(12),CF1(12),DF(12),TF(12),TM(12,1)
      TFFI=283.
      DO 10 II=1,M
      TFX(II)=TF(II)*TO+TFFI
      TMXR(II,1)=TM(II,1)*TO+TFFI
10    CONTINUE
      TFX(M+1)=TFX(M)
      TMXR(M+1,1)=TMXR(M,1)
      DO 20 II=1,M
      TBF(II)=(TFX(II)+TFX(II+1))/2.
      TP(II)=(TMXR(II,1)+TMXR(II+1,1))/2.
      NI(II)=(72.72-1.135*TBF(II)+.646E-2*TBF(II)**2.)*1.E-6
      RE(II)=AUX/NI(II)
      MIFP(II)=(.06836-.1053E-2*TP(II)+.4104E-5*TP(II)**2)
      MIF(II)=(.06836-.1053E-2*TBF(II)+.4101E-5*TBF(II)**2)
      CP(II)=1.838+.003699*TBF(II)
      DF(II)= 903.-.6706*TBF(II)
      KF(II)=(.1394-.9661E-4*TBF(II))*1.E-3
      CF1(II)=CP(II)*DF(II)
      PR(II)=CP(II)*MIF(II)/KF(II)
      zzz=re(ii)*pr(ii)
      Z1=zzz**.333
      Z2=(2.*RI/XL)**.333
      Z3=(MIF(II)/MIFP(II))**.14
      NU(II)=7.2*Z1*Z2*Z3
      HI1(II)=NU(II)*KF(II)/(2.*RI)
20    CONTINUE
      RETURN
      END
C.....................
C...   SUBROTINA CALOR
C
      SUBROUTINE CALOR(TO,TO,N,XL,RI,S2,S,TMI,ANX,DM,CM,M,QPX)
      Implicit double precision (a-h,o-z)
      DIMENSION VT(12),STMXR(12),TM1(12,12),STM(12),QP(13)
      REAL KT(12,12)
      TFFI=283.
C      to=321.
      DO 10 JA=1,N
      DO 10 II=1,M
      KT(II,JA)=TM1(II,JA)*TO+TFFI
C      write(*,*)'kt=',kt(ii,ja)
10    CONTINUE
      NN=N-1
      VT(1)=XL*3.1416*((RI+S2/S)**2-RI**2)
      DO 700 JC=2,NN
      KJC=JC-1
      XJC=FLOAT(KJC)
      XIJ=FLOAT(JC)
      VT(JC)=XL*3.1416*((RI+XIJ*S2/S)**2-(RI+XJC*S2/S)**2)
700   CONTINUE
      DO 710 JC=1,N
      STMXR(JC)=80.
      DO 710 IC=1,M
      STMXR(JC)=KT(IC,JC)+STMXR(JC)
710   CONTINUE
C       STM(1)=TO
      STM(1)=(STMXR(1)+STMXR(2))/(2.*ANX)
      QP(1)=VT(1)*ABS(STM(1)-TO)*DM*CM
C      write(*,*)'stm(1)=',stm(1) ,  'qp(1)=',qp(1)
C       QP(1)=0.
      DO 720 JC=2,NN
      STM(JC)=(STMXR(JC)+STMXR(JC+1))/(2.*ANX)
      QP(JC)=VT(JC)*ABS(STM(JC)-TO)*DM*CM+QP(JC-1)
```

```
      QP(JJ)=VT(JJ)*ABS(STM(JJ)**TO)*DM*CNTQP(JJ-1)
C      write(*,*)'stm(jc)=',stm(jc),  'vt(jc)=',vt(jc)
720   CONTINUE
      QPX=QP(NN)
      RETURN
      END

C:\FORTRAN>
```

```
C1234567890.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....

      implicit double precision (a-h,o-z)
      DIMENSION TM1(13,11),TM(13,11),TFF1(12),TFF(12),QPE(200),
     *  HI1(12),CF1(12),TBFQ(12),TBFF(12),TMXR(12,12),
     *  CP(12),PR(12),DF(12),STMXR(12),STM(12),VT(12),Q(10040),
     *  TFQN(12),TFQ(12),TPF(12),TPQ(12),REFF(12),REFQ(12),DFFQ(12),
     *  HIFF1(12),HIFQ1(12),RE(12),TBF(12),TP(12),TF(12),CPFQ(12),
     *  CPFF(12),PRFF(12),PRFQ(12),CFFQ1(12),CFFF1(12),DFFF(12)

      REAL NU(12),KF(12),NI(12),MIF(12),MIFP(12),KT(12,12),NUFQ(12)
      REAL KFF(12),KFQ(12),NUFF(12)
      open(unit=1,file='arqporc3.dat',status='new')
      open(unit=2,file='arqtemc3.dat',status='new')
      open(unit=3,file='arqcalc3.dat',status='new')
C.....
C
C          PROGRAMA      MECONS3
C.....
C
C...  LISTA  DE  VARIAVEIS
C
C     RI      : Raio interno do tubo (m)
C     RO      : Raio externo do tubo (m)
C     XL      : Comprimento do tubo  (m)
C     CM      : Calor especifico do material (kj/kg*c)
C     AKM     : Condutividade termica do material (kj/s*m*c)
C     DM      : Densidade do material (kg/m**3)
C     CPFF    : Calor especifico do fluido frio (kj/kg*c)
C     CPFQ    : Calor especifico do fluido quente (kj/kg*c)
C     HIF     : Coeficiente de conveccao interno  (kw/m**2*c)
C     HIQ     : Coeficiente de conveccao externo  (kw/m**2*c)
C     VFF     : Velocidade do fluido frio (m/s)
C     VFQ     : Velocidade do fluido quente (m/s)
C     CFF     : Valor inicial do calor especifico do fluido frio (kj/kg*c)
C     CFQ     : Valor inicial do calor especifico do fluido quente(kj/kg*c)
C     AMFF    : Massa do fluido frio escoando  (kg/s)
C     AMFQ    : Massa do fluido quente escoando (kg/s)
C     TFF     : Temperatura do fluido frio   (K)
C     TFQ     : Temperatura do fluido quente (K)
C     TM      : Temperatura do material      (K)
C     TFFI    : Temperatura do fluido frio   na entrada do tubo no tempo zero (K
C     TFQI    : Temperatura do fluido quente na entrada do tubo no tempo zero (K
C     TO      : Temperatura do material no tempo zero (K)
C     TI      : Intervalo de tempo entre a impressao de duas tabelas (s)
C     TFI     : Tempo final de impressao (s)
C     DT      : Incremento de tempo  (s)
C     M       : Numero de estacoes no comprimento do tubo
C     N       : Numero de divisoes do raio do tubo
C     TPF     : Temperatura da parede fria    (K)
C     TPQ     : Temperatura da parede quente  (K)
C     REFF    : Reynolds do fluido frio
C     REFQ    : Reynolds do fluido quente
C     DFFQ    : Diferenca de temperatura do fluido quente  (K)
C     DTFF    : Diferenca de temperatura do fluido frio    (K)
C
C.....
C
C...   DADOS DE ENTRADA
C
       DATA RI,RO,XL,AMFF,AMFQ,CFF,CFQ,CM,AKM,DM/.014,.042,1.00,.0[illegible]
     *.0005,4180.7,1833.7,.465,.054,7840./
C
       DTF= 505
```

```
      HIQ=.637
      VF=.796
      VQ=.796
      TFFI=283.
      TFQmax=433.
      TFQI=383.
      TO=323.
      TD=(TFQI-TO)+(TO-TFFI)
      AUXFI=4.*AMFF/(6.28*RI)
      AUXFQ=4.*AMFQ/(6.28*RO)
      TI=5.0
      TFI=50000.
      DT=.1
      M=11
      N=11
      kont=80
      a=.5
      p=600.
      w=6.2832/p
      ANX=FLOAT(M)
      ANR=FLOAT(N)
      L=2
      NT=10000
      TR=0.
      TFF1(1)=0.
      TFF(1)=0.
      TFQN(1)=1.
      TFQ(1)=1.
      S2=RO-RI
      S=ANR-1.
      ALFA=AKM/(CM*DM)
      S1=((S**2)*ALFA)/(2.*S2)
      QMAX=DM*CM*3.1416*(RO**2-RI**2)*XL*TD
      write(*,*)'          qmax= ',qmax
      DQSFF=6.28*RO*HIF*XL/(AMFF*CFF*(ANX-1.))
      DQSFQ=6.28*RI*HIQ*XL/(AMFQ*CFQ*(ANX-1.))
      U=RI/RO
      AFF=(((ANX-1.)/XL)**2)*ALFA
      AFQ=(((ANX-1.)/XL)**2)*ALFA
      BFF=(((ANR-1.)/(RO-RI))**2)*ALFA
      BFQ=(((ANR-1.)/(RO-RI))**2)*ALFA
C     CFF=(HIF*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
C      CFQ=(HIQ*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
      WRITE(*,3)DQSff,ALFA,U,Aff,Bff,Cff
      write (*,3)DQSfq,ALFA,u,afq,bfq,cfq
C
C...  DISTRIBUICAO E IMPRESSAO DA TEMPERATURA INICIAL
C
      WRITE(*,13)TR
      WRITE(*,33)(LX,LX=1,N)
      DO 10 I=1,M
      tff(I+1)=0.
      tfq(I)=1.
      DO 11 J=1,N
      TM(I,J)=0.4
11    CONTINUE
      WRITE(*,23)I,TFq(I),(TM(I,JX),JX=1,N),TFf(I)
10    CONTINUE
C
C...  MONTAGEM DAS TABELAS
C
      DO 20 KK=1,NT
      XKK=FLOAT(KK)
      TR=XKK*TI
      WRITE(*,13)TR
      WRITE(*,33)(LL,LL=1,N)
```

```
      DO 30 K=1,L
      DO 40 J=1,N
      IF(J.EQ.N)GOTO 19
      IF(J.NE.1)GOTO 29
C
C...  CALCULO DA TEMP. DO MATERIAL E DO LADO INTERNO ( Fluido Quente )
C
      If(tfq(2).le.tm(2,1))stop
      TM(M+1,1)=TM(M,1)
      TM(M+2,1)=TM(M,1)
      CALL HC(AMFQ,RI,TFQ,TM,TD,TO,XL,AUXFQ,M,N,TBFQ,TPQ,
     *  REFQ,NUFQ,HIFQ1,CPFQ,KFQ,PRFQ,CFFQ1,DFFQ)
      DO 50 I=1,M
      CTFQ=(HIFQ1(I)*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
      TM1(I,J)=TM(I,J)+DT*ABS(AFQ*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+TM
     *  (I+2,J))+BFQ*(TM(I,J+2)-2.*TM(I,J+1)+TM(I,J))-CTFQ*
     *  (TFQ(I)-TM(I,J)))
      DQSQ1=6.28*RI*HIQ*XL/(AMFQ*CFFQ1(I)*(ANX-1.))
      TFQN(I+1)=DQSQ1*(TM1(I,J)-TFQ(I))+TFQ(I)
50    CONTINUE
      GO TO 40
C
C...  DISTRIBUICAO DE TEMPERATURA DENTRO DO MATERIAL
C
29    XJ=FLOAT(J-1)
      D=S1/(RI*S+S2*XJ)
      TM(M+1,J)=TM(M,J)
      TM(M+2,J)=TM(M,J)
      DO 60 I=1,M
            absolu = ABS(AFQ*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+
     *  TM(I+2,J))+BFQ*(TM(I,J+1)-2.*TM(I,J)+TM(I,J-1))
     *  +D*(TM(I,J+1)-TM(I,J-1)))
      TM1(I,J) = TM(I,J) + DT * absolu
60    continue
      GO TO 40
C
C...  CALCULO DA TEMPERATURA DO LADO EXTERNO ( Fluido Frio )
C
19    TM(M+1,J)=TM(M,N)
      TM(M+2,J)=TM(M,N)
      CALL HC(AMFF,RO,TFF,TM,TD,TO,XL,AUXFF,M,N,TBFF,TPF,
     *  REFF,NUFF,HIFF1,CPFF,KFF,PRFF,CFFF1,DFFF)
      DO 140 I=M,1,-1
         CTF=(HIFF1(I)*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
         TM1(I,J)=TM(I,J)+DT*ABS(AFF*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+TM
     *              (I+2,J))+BFF*(TM(I,J)-2.*TM(I,J-1)+TM(I,J-2))-CTF*
     *              (TFF(I)-TM(I,J)))
         DQSF1=6.28*RO*HIF*XL/(AMFF*CFFF1(I)*(ANX-1.))
        TFF1(I-1)=DQSF1*(TM1(I,J)-TFF(I))+TFF(I)
 140  CONTINUE
40    CONTINUE
 30    continue
      DO 230 K=1,L
      CALL CALOR(TD,TO,N,XL,RI,S2,S,TM1,ANX,DM,CM,M,QPX)
      QPE(K)=QPX
230   CONTINUE
      SOMATM=0.
      DO 130 I=1,M
      TFF(I)=TFf1(I)
      TFQ(I)=TFqN(I)
            DO 130 J=1,N
         TM(I,J)=TM1(I,J)
      SOMATM=SOMATM+TM(I,J)
130   CONTINUE
      TMMED=SOMATM/121
C
```

```
C...    CALCULO DO DESEMPENHO
C
        If(KK.ge.8)then
        QFFQ=AMFQ*CFQ*((TFQ(1)-TFQ(11))*TD+TFFI)
        QRFF=AMFF*CFF*((TFF(1)-TFF(11))*TD+TFFI)
        QTAX=AMFF*CFF*((TFQ(1)-TFF(11))*TD+TFFI)
        DES=ABS((QFFQ-QRFF)/QFFQ)*100
        EFE=ABS(QFFQ*100/QTAX)
        endif
C
C...    CALCULO DO CALOR ARMAZENADO
C
        Q(KK)=QPE(L)*100./QMAX
C
        zkk=kk*dt
        IF(KK.LE.40.OR.KK.GT.9960) THEN
          WRITE(1,888)ZKK,Q(KK),EFE,DES
          write(2,999)ZKK,TFF(1),TFQ(1),TMMED
          write(3,777)ZKK,Q(KK)
        ELSE
         IF(KK.EQ.KONT) THEN
          WRITE(1,888)ZKK,Q(KK),EFE,DES
          write(2,999)ZKK,TFF(1),TFQ(1),TMMED
          write(3,777)ZKK,Q(KK)
          KONT=KONT+40
         ENDIF
        ENDIF
C
C....   IMPRESSAO DOS RESULTADOS
c
        write(*,*)kk
        DO 90 I=1,M
        WRITE(*,23)I,TFQ(I),(TM(I,JZ),JZ=1,N),TFF(I)
90      CONTINUE
        WRITE(*,43)Q(KK)
        WRITE(*,63)des
        write(*,73)efe
        write(*,83)TMmed
20      CONTINUE
3       FORMAT(3X,'DQS=',2X,F15.8,/3X,'ALFA',2X,F15.8,
     */3X,'U=',2X,F15.8,/3X,'A=',2X,F15.8,/3X,'B=',2X
     *,F15.8,/3X,'C=',2X,F15.8,/)
13      FORMAT(////7X,'NO INSTANTE=',2X,F9.3,1X,'SEG',
     *///40X,'TEMPERATURA DO MATERIAL',/)
C
23      FORMAT(1X,I2,2X,F6.4,3X,11(F6.4),3X,F6.4)
33      FORMAT(//8X,'TFQ',7X,11(I2,4X),2X,'TFF')
43      FORMAT(//3X,'CALOR ARMAZENADO=',F10.4)
C
53      FORMAT(3X,I2,2X,5(E9.3))
63      FORMAT(6X,'DESEMPENHO=',F11.4)
73      FORMAT(8X,'EFETIVIDADE=',F11.4)
83      FORMAT(10X,'TMmed=',F11.4)
999     FORMAT(1X,F10.4,3(1X,F6.4))
888     format(1x,f10.4,3(1x,f10.4))
777     format(1x,f10.4,1x,f10.4)
        STOP
        END
C.........................
C...    SUBROTINA  HC
C
        SUBROUTINE HC(AMF,RI,TF,TM,TD,TO,XL,AUX,M,N,
     *  TBF,TP,RE,NU,HI1,CP,KF,PR,CF1,DF)
        Implicit double precision (a-h,o-z)
        REAL NI(12),MIFP(12),MIF(12),KF(12),NU(12)
        DIMENSION TFX(12),TMXR(12,12),TBF(12),TP(12),
```

```
     *  RE(12),HI1(12),CP(12),PR(12),CF1(12),DF(12),TF(12),TM(12,1)
        TFFI=283.
        DO 10 II=1,M
        TFX(II)=TF(II)*TD+TFFI
        TMXR(II,1)=TM(II,1)*TD+TFFI
10      CONTINUE
        TFX(M+1)=TFX(M)
        TMXR(M+1,1)=TMXR(M,1)
        DO 20 II=1,M
        TBF(II)=(TFX(II)+TFX(II+1))/2.
        TP(II)=(TMXR(II,1)+TMXR(II+1,1))/2.
        NI(II)=(72.72-1.136*TBF(II)+.646E-2*TBF(II)**2.)*1.E-6
        RE(II)=AUX/NI(II)
        MIFP(II)=(.06836-.1053E-2*TP(II)+.4104E-5*TP(II)**2)
        MIF(II)=(.06836-.1053E-2*TBF(II)+.4101E-5*TBF(II)**2)
        CP(II)=1.838+.003699*TBF(II)
        DF(II)= 903.-.6706*TBF(II)
        KF(II)=(.1394-.9661E-4*TBF(II))*1.E-3
        CF1(II)=CP(II)*DF(II)
        PR(II)=CP(II)*MIF(II)/KF(II)
        zzz=re(II)*pr(II)
        Z1=zzz**.333
        Z2=(2.*RI/XL)**.333
        Z3=(MIF(II)/MIFP(II))**.14
        NU(II)=7.2*Z1*Z2*Z3
        HI1(II)=NU(II)*KF(II)/(2.*RI)
20      CONTINUE
        RETURN
        END
C.........................
C...    SUBROTINA CALOR
C
        SUBROUTINE CALOR(TD,TO,N,XL,RI,S2,S,TM1,ANX,DM,CM,M,QPX)
        implicit double precision (a-h,o-z)
        DIMENSION VT(12),STMXR(12),TM1(12,12),STM(12),QP(13)
        REAL KT(12,12)
        TFFI=283.
C        to=321.
        DO 10 JA=1,N
        DO 10 II=1,M
        KT(II,JA)=TM1(II,JA)*TD+TFFI
C        write(*,*)'kt=',kt(II,ja)
10      CONTINUE
        NN=N-1
        VT(1)=XL*3.1416*((RI+S2/S)**2-RI**2)
        DO 700 JC=2,NN
        KJC=JC-1
        XJC=FLOAT(KJC)
        XIJ=FLOAT(JC)
        VT(JC)=XL*3.1416*((RI+XIJ*S2/S)**2-(RI+XJC*S2/S)**2)
700     CONTINUE
        DO 710 JC=1,N
        STMXR(JC)=80.
        DO 710 IC=1,M
        STMXR(JC)=KT(IC,JC)+STMXR(JC)
710     CONTINUE
C        STM(1)=TO
        STM(1)=(STMXR(1)+STMXR(2))/(2.*ANX)
        QP(1)=VT(1)*ABS(STM(1)-TO)*DM*CM
C        write(*,*)'stm(1)=',stm(1) ,  'qp(1)=',qp(1)
C        QP(1)=0.
        DO 720 JC=2,NN
        STM(JC)=(STMXR(JC)+STMXR(JC+1))/(2.*ANX)
        QP(JC)=VT(JC)*ABS(STM(JC)-TO)*DM*CM+QP(JC-1)
C        write(*,*)'stm(jc)=',stm(jc),  'vt(jc)=',vt(jc)
720     CONTINUE
```

```
      QPX=QP(NN)
      RETURN
      END

C:\FORTRAN>
```

```
          type mevar1.for
C1234567890.........2.........3.........4.........5.........6.........7.......

      implicit double precision (a-h,o-z)
      DIMENSION TM1(13,11),TM(13,11),TFF1(12),TFF(12),QPE(200),
     *  HI1(12),CF1(12),TBFQ(12),TBFF(12),TMXR(12,12),
     *  CP(12),PR(12),DF(12),STMXR(12),STM(12),VT(12),Q(1004),
     *  TFQN(12),TFQ(12),TPF(12),TPQ(12),REFF(12),REFQ(12),DFFQ(12),
     *  HIFF1(12),HIFQ1(12),RE(12),TBF(12),TP(12),TF(12),CPFQ(12),
     *  CPFF(12),PRFF(12),PRFQ(12),CFFQ1(12),CFFF1(12),DFFF(12)

      REAL NU(12),KF(12),NI(12),MIF(12),MIFP(12),KT(12,12),NUFQ(12)
      REAL KFF(12),KFQ(12),NUFF(12)
      open(unit=1,file='arqporv1.dat',status='new')
      open(unit=2,file='arqtemv1.dat',status='new')
      open(unit=3,file='arqcalv1.dat',status='new')
C.....
C
C                PROGRAMA      MEVAR1
C.....
C
C...  LISTA  DE  VARIAVEIS
C
C     RI      : Raio interno do tubo    (m)
C     RO      : Raio externo do tubo    (m)
C     XL      : Comprimento do tubo     (m)
C     CM      : Calor especifico do material (kj/kg*c)
C     AKM     : Condutividade termica do material (kj/s*m*c)
C     DM      : Densidade do material (kg/m**3)
C     CPFF    : Calor especifico do fluido frio (kj/m**3*c)
C     CPFQ    : Calor especifico do fluido quente (kj/m**3*c)
C     HIF     : Coeficiente de conveccao interno  (kw/m**2*c)
C     HIQ     : Coeficiente de conveccao externo  (kw/m**2*c)
C     VFF     : Velocidade do fluido frio (m/s)
C     VFQ     : Velocidade do fluido quente (m/s)
C     CFF     : Valor inicial do calor especifico do fluido frio (kj/kg*c)
C     CFQ     : Valor inicial do calor especifico do fluido quente(kj/kg*c)
C     AMFF    : Massa do fluido frio escoando  (kg/s)
C     AMFQ    : Massa do fluido quente escoando (kg/s)
C     TFF     : Temperatura do fluido frio  (K)
C     TFQ     : Temperatura do fluido quente (k)
C     TM      : Temperatura do material  (K)
C     TFFI    : Temperatura do fluido frio   na entrada do tubo no tempo zero (K)
C     TFQI    : Temperatura do fluido quente na entrada do tubo no tempo zero (K)
C     TO      : Temperatura do material no tempo zero (K)
C     TI      : Intervalo de tempo entre a impressao de duas tabelas (s)
C     TFI     : Tempo final de impressao (s)
C     DT      : Incremento de tempo (s)
C     M       : Numero de estacoes no comprimento do tubo
C     N       : Numero de divisoes do raio do tubo
C     TPF     : Temperatura da parede fria (K)
C     TPQ     : Temperatura da parede quente  (K)
C     REFF    : Reynolds do fluido frio
C     REFQ    : Reynolds do fluido quente
C     DFFQ    : Diferenca de temperatura do fluido quente  (K)
C     DTFF    : Diferenca de temperatura do fluido frio    (K)
C
C.....
C
C...   DADOS DE ENTRADA
C
       DATA RI,RO,XL,AMFF,AMFQ,CFF,CFQ,CM,AKM,DM/.014,.035,1.00,.0001,
     *.0005,4180.7,1833.7,.465,.054,7840./
C
```

```
      HIQ=.637
      VF=.796
      VQ=.796
      TFFI=283.
      TFQmax=433.
      TFQI=383.
      TO=323.
      TD=(TFQI-TO)+(TO-TFFI)
      AUXFI=4.*AMFF/(6.28*RI)
      AUXFQ=4.*AMFQ/(6.28*RO)
      TI=5.0
      TFI=50000.
      DT=.1
      M=11
      N=11
      kont=80
      a=.5
      p=600.
      w=6.2832/p
      ANX=FLOAT(M)
      ANR=FLOAT(N)
      L=2
      NT=10000
      TR=0.
      TFF1(1)=0.
      TFF(1)=0.
      TFQN(1)=1.
      TFQ(1)=1.
      S2=RO-RI
      S=ANR-1.
      ALFA=AKM/(CM*DM)
      S1=((S**2)*ALFA)/(2.*S2)
      QMAX=DM*CM*3.1416*(RO**2-RI**2)*XL*TD
c      write(*,*)'          qmax= ',qmax
      DQSFF=6.28*RO*HIF*XL/(AMFF*CFF*(ANX-1.))
      DQSFQ=6.28*RI*HIQ*XL/(AMFQ*CFQ*(ANX-1.))
      U=RI/RO
      AFF=(((ANX-1.)/XL)**2)*ALFA
      AFQ=(((ANX-1.)/XL)**2)*ALFA
      BFF=(((ANR-1.)/(RO-RI))**2)*ALFA
      BFQ=(((ANR-1.)/(RO-RI))**2)*ALFA
C     CFF=(HIF*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
C      CFQ=(HIQ*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
      WRITE(*,3)DQSff,ALFA,U,Aff,Bff,Cff
      write (*,3)DQSfq,ALFA,u,afq,bfq,cfq
C
C...  DISTRIBUICAO E IMPRESSAO DA TEMPERATURA INICIAL
C
      WRITE(*,13)TR
      WRITE(*,33)(LX,LX=1,N)
      DO 10 I=1,M
      tff(I+1)=0.
      tfq(I)=1.
      DO 11 J=1,N
      TM(I,J)=0.4
11    CONTINUE
      WRITE(*,23)I,TFq(I),(TM(I,JX),JX=1,N),TFf(I)
10    CONTINUE
C
C...  MONTAGEM DAS TABELAS
C
      DO 20 KK=1,NT
      If(kk.gt.5.and.kk.lt.3005)then
            t = t + DT
            tfqn(1) = (1 + a*sin(w*t))
      endif
```

```
      XKK=FLOAT(KK)
      TR=XKK*TI
      WRITE(*,13)TR
      WRITE(*,33)(LL,LL=1,N)
      DO 30 K=1,L
      DO 40 J=1,N
      IF(J.EQ.N)GOTO 19
      IF(J.NE.1)GOTO 29
C
C...  CALCULO DA TEMP. DO MATERIAL E DO LADO INTERNO ( Fluido Quente )
C
      If(tfq(2).le.tm(2,1))stop
      TM(M+1,1)=TM(M,1)
      TM(M+2,1)=TM(M,1)
      CALL HC(AMFQ,RI,TFQ,TM,TD,TO,XL,AUXFQ,M,N,TBFQ,TPQ,
     *  REFQ,NUFQ,HIFQ1,CPFQ,KFQ,PRFQ,CFFQ1,DFFQ)
      DO 50 I=1,M
      CTFQ=(HIFQ1(I)*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
      TM1(I,J)=TM(I,J)+DT*ABS(AFQ*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+TM
     *  (I+2,J))+BFQ*(TM(I,J+2)-2.*TM(I,J+1)+TM(I,J))-CTFQ*
     *  (TFQ(I)-TM(I,J)))
      DQSQ1=6.28*RI*HIQ*XL/(AMFQ*CFFQ1(I)*(ANX-1.))
      TFQN(I+1)=DQSQ1*(TM1(I,J)-TFQ(I))+TFQ(I)
50    CONTINUE
      GO TO 40
C
C...  DISTRIBUICAO DE TEMPERATURA DENTRO DO MATERIAL
C
29    XJ=FLOAT(J-1)
      D=S1/(RI*S+S2*XJ)
      TM(M+1,J)=TM(M,J)
      TM(M+2,J)=TM(M,J)
      DO 60 I=1,M
         absolu = ABS(AFQ*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+
     *  TM(I+2,J))+BFQ*(TM(I,J+1)-2.*TM(J,J)+TM(I,J-1))
     *  +D*(TM(I,J+1)-TM(I,J-1)))
      TM1(I,J) = TM(I,J) + DT * absolu
60    continue
      GO TO 40
C
C...  CALCULO DA TEMPERATURA DO LADO EXTERNO ( Fluido Frio )
C
19    TM(M+1,J)=TM(M,N)
      TM(M+2,J)=TM(M,N)
      CALL HC(AMFF,RO,TFF,TM,TD,TO,XL,AUXFF,M,N,TBFF,TPF,
     *  REFF,NUFF,HIFF1,CPFF,KFF,PRFF,CFFF1,DFFF)
      DO 140 I=M,1,-1
         CTF=(HIFF1(I)*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
         TM1(I,J)=TM(I,J)+DT*ABS(AFF*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+TM
     *              (I+2,J))+BFF*(TM(I,J)-2.*TM(I,J-1)+TM(I,J-2))-CTF*
     *              (TFF(I)-TM(I,J)))
         DQSF1=6.28*RO*HIF*XL/(AMFF*CFFF1(I)*(ANX-1.))
        TFF1(I-1)=DQSF1*(TM1(I,J)-TFF(I))+TFF(I)
 140  CONTINUE
40    CONTINUE
 30    continue
      DO 230 K=1,L
      CALL CALOR(TD,TO,N,XL,RI,S2,S,TM1,ANX,DM,CM,M,QPX)
      QPE(K)=QPX
230   CONTINUE
      SOMATM=0.
      DO 130 I=1,M
      TFF(I)=TFf1(I)
      TFQ(I)=TFqN(I)
            DO 130 J=1,N
      TM(I,J)=TM1(I,J)
```

```
          SOMATM=SOMATM+TM(I,J)
130       CONTINUE
          TMMED=SOMATM/121
C
C...    CALCULO DO DESEMPENHO
C
          If(KK.ge.8)then
          QFFQ=AMFQ*CFQ*((TFQ(1)-TFQ(11))*TD+TFFI)
          QRFF=AMFF*CFF*((TFF(1)-TFF(11))*TD+TFFI)
          QTAX=AMFF*CFF*((TFQ(1)-TFF(11))*TD+TFFI)
          DES=ABS((QFFQ-QRFF)/QFFQ)*100
          EFE=ABS(QFFQ*100/QTAX)
          endif
C
C...    CALCULO DO CALOR ARMAZENADO
C
          Q(KK)=QPE(L)*100./QMAX
C
          zkk=kk*dt
          IF(KK.LE.40.OR.KK.GT.9960) THEN
            WRITE(1,888)ZKK,Q(KK),EFE,DES
            write(2,999)ZKK,TFF(1),TFQ(1),TMMED
            write(3,777)ZKK,Q(KK)
          ELSE
           IF(KK.EQ.KONT) THEN
            WRITE(1,888)ZKK,Q(KK),EFE,DES
            write(2,999)ZKK,TFF(1),TFQ(1),TMMED
            write(3,777)ZKK,Q(KK)
            KONT=KONT+40
           ENDIF
          ENDIF
C
C....    IMPRESSAO DOS RESULTADOS
c
          write(*,*)kk
          DO 90 I=1,M
          WRITE(*,23)I,TFQ(I),(TM(I,JZ),JZ=1,N),TFF(I)
90        CONTINUE
          WRITE(*,43)Q(KK)
          WRITE(*,63)des
          write(*,73)efe
          write(*,83)TMmed
20        CONTINUE
3         FORMAT(3X,'DQS=',2X,F15.8,/3X,'ALFA',2X,F15.8,
       */3X,'U=',2X,F15.8,/3X,'A=',2X,F15.8,/3X,'B=',2X
       *,F15.8,/3X,'C=',2X,F15.8,/)
13        FORMAT(////7X,'NO INSTANTE=',2X,F9.3,1X,'SEG',
       *///40X,'TEMPERATURA DO MATERIAL',/)
C
23        FORMAT(1X,I2,2X,F6.4,3X,11(F6.4),3X,F6.4)
33        FORMAT(//8X,'TFQ',7X,11(I2,4X),2X,'TFF')
43        FORMAT(//3X,'CALOR ARMAZENADO=',F10.4)
C
53        FORMAT(3X,I2,2X,5(E9.3))
63        FORMAT(6X,'DESEMPENHO=',F11.4)
73        FORMAT(8X,'EFETIVIDADE=',F11.4)
83        FORMAT(10X,'TMmed=',F11.4)
999       FORMAT(1X,F10.4,3(1X,F6.4))
888       format(1x,f10.4,3(1x,f10.4))
777       format(1x,f10.4,1x,f10.4)
          STOP
          END
C.........................
C...    SUBROTINA  HC
C
          SUBROUTINE HC(AMF,RI,TF,TM,TD,TO,XL,AUX,M,N,
```

```
     *   TBF,TP,RE,NU,HI1,CP,KF,PR,CF1,DF)
         Implicit double precision (a-h,o-z)
         REAL NI(12),MIFP(12),MIF(12),KF(12),NU(12)
         DIMENSION TFX(12),TMXR(12,12),TBF(12),TP(12),
     *   RE(12),HI1(12),CP(12),PR(12),CF1(12),DF(12),TF(12),TM(12,1)
         TFFI=283.
         DO 10 II=1,M
         TFX(II)=TF(II)*TD+TFFI
         TMXR(II,1)=TM(II,1)*TD+TFFI
10       CONTINUE
         TFX(M+1)=TFX(M)
         TMXR(M+1,1)=TMXR(M,1)
         DO 20 II=1,M
         TBF(II)=(TFX(II)+TFX(II+1))/2.
         TP(II)=(TMXR(II,1)+TMXR(II+1,1))/2.
         NI(II)=(72.72-1.135*TBF(II)+.646E-2*TBF(II)**2.)*1.E-6
         RE(II)=AUX/NI(II)
         MIFP(II)=(.06836-.1053E-2*TP(II)+.4104E-5*TP(II)**2)
         MIF(II)=(.06836-.1053E-2*TBF(II)+.4101E-5*TBF(II)**2)
         CP(II)=1.838+.003699*TBF(II)
         DF(II)= 903.-.6706*TBF(II)
         KF(II)=(.1394-.9661E-4*TBF(II))*1.E-3
         CF1(II)=CP(II)*DF(II)
         PR(II)=CP(II)*MIF(II)/KF(II)
         zzz=re(II)*pr(II)
         Z1=zzz**.333
         Z2=(2.*RI/XL)**.333
         Z3=(MIF(II)/MIFP(II))**.14
         NU(II)=7.2*Z1*Z2*Z3
         HI1(II)=NU(II)*KF(II)/(2.*RI)
20       CONTINUE
         RETURN
         END
C.........................
C...   SUBROTINA CALOR
C
         SUBROUTINE CALOR(TD,TO,N,XL,RI,S2,S,TM1,ANX,DM,CM,M,QPX)
         Implicit double precision (a-h,o-z)
         DIMENSION VT(12),STMXR(12),TM1(12,12),STM(12),QP(13)
         REAL KT(12,12)
         TFFI=283.
C         to=321.
         DO 10 JA=1,N
         DO 10 II=1,M
         KT(II,JA)=TM1(II,JA)*TD+TFFI
C         write(*,*)'kt=',kt(ii,ja)
10       CONTINUE
         NN=N-1
         VT(1)=XL*3.1416*((RI+S2/S)**2-RI**2)
         DO 700 JC=2,NN
         KJC=JC-1
         XJC=FLOAT(KJC)
         XIJ=FLOAT(JC)
         VT(JC)=XL*3.1416*((RI+XIJ*S2/S)**2-(RI+XJC*S2/S)**2)
700      CONTINUE
         DO 710 JC=1,N
         STMXR(JC)=80.
         DO 710 IC=1,M
         STMXR(JC)=KT(IC,JC)+STMXR(JC)
710      CONTINUE
C         STM(1)=TO
         STM(1)=(STMXR(1)+STMXR(2))/(2.*ANX)
         QP(1)=VT(1)*ABS(STM(1)-TO)*DM*CM
C         write(*,*)'stm(1)=',stm(1) ,   'qp(1)=',qp(1)
C         QP(1)=0.
         DO 720 JC=2,NN
```

```
          STM(JC)=(STMXR(JC)+STMXR(JC+1))/(2.*ANX)
          QP(JC)=VT(JC)*ABS(STM(JC)-TO)*DM*CM+QP(JC-1)
C          write(*,*)'stm(jc)=',stm(jc),   'vt(jc)=',vt(jc)
720       CONTINUE
          QPX=QP(NN)
          RETURN
          END

C:\FORTRAN>
```

```
      implicit double precision (a-h,o-z)
      DIMENSION TM1(13,11),TM(13,11),TFF1(12),TFF(12),QPE(200),
     *  HI1(12),CF1(12),TBFQ(12),TBFF(12),TMXR(12,12),
     *  CP(12),PR(12),DF(12),STMXR(12),STM(12),VT(12),Q(20000),
     *  TFQN(12),TFQ(12),TPF(12),TPQ(12),REFF(12),REFQ(12),DFFQ(12),
     *  HIFF1(12),HIFQ1(12),RE(12),TBF(12),TP(12),IF(12),CPFQ(12),
     *  CPFF(12),PRFF(12),PRFQ(12),CFFQ1(12),CFFF1(12),DFFF(12)

      REAL NU(12),KF(12),NI(12),MIF(12),MIFP(12),KT(12,12),NUFQ(12)
      REAL KFF(12),KFQ(12),NUFF(12)
      open(unit=1,file='ar4porv2.dat',status='new')
      open(unit=2,file='arqtemv2.dat',status='new')
      open(unit=3,file='arqcalv2.dat',status='new')
C.....
C
C                  PROGRAMA     MEVAR2
C.....
C
C...  LISTA  DE  VARIAVEIS
C
C     RI     .: Raio interno do tubo    (m)
C     RO      : Raio externo do tubo    (m)
C     XL      : Comprimento do tubo     (m)
C     CM      : Calor especifico do material (kj/kg*c)
C     AKM     : Condutividade termica do material (kj/s*m*c)
C     DM      : Densidade do material (kg/m**3)
C     CPFF    : Calor especifico do fluido frio (kj/kg*c)
C     CPFQ    : Calor especifico do fluido quente (kj/kg*c)
C     HIF     : Coeficiente de conveccao interno  (kw/m**2*c)
C     HIQ     : Coeficiente de conveccao externo  (kw/m**2*c)
C     VFF     : Velocidade do fluido frio (m/s)
C     VFQ     : Velocidade do fluido quente (m/s)
C     CFF     : Valor inicial do calor especifico do fluido frio (kj/kg*c)
C     CFQ     : Valor inicial do calor especifico do fluido quente (kj/kg*c)
C     AMFF    : Massa do fluido frio escoando  (kg/s)
C     AMFQ    : Massa do fluido quente escoando (kg/s)
C     TFF     : Temperatura do fluido frio  (K)
C     TFQ     : Temperatura do fluido quente (K)
C     TM      : Temperatura do material (K)
C     TFFI    : Temperatura do fluido frio   na entrada do tubo no tempo zero (K)
C     TFQI    : Temperatura do fluido quente na entrada do tubo no tempo zero (K)
C     TO      : Temperatura do material no tempo zero (K)
C     TI      : Intervalo de tempo entre a impressao de duas tabelas (s)
C     TFI     : Tempo final de impressao (s)
C     DT      : Incremento de tempo (s)
C     M       : Numero de estacoes no comprimento do tubo
C     N       : Numero de divisoes do raio do tubo
C     TPF     : Temperatura da parede fria  (K)
C     TPQ     : Temperatura da parede quente (K)
C     REFF    : Reynolds do fluido frio
C     REFQ    : Reynolds do fluido quente
C     DFFQ    : Diferenca de temperatura do fluido quente (K)
C     DTFF    : Diferenca de temperatura do fluido frio   (K)
C
C.....
C
C...   DADOS DE ENTRADA
C
       DATA RI,RO,XL,AMFF,AMFQ,CFF,CFQ,CM,AKM,DM/.014,.035,1.08,.000164,
     *.0005,4180.7,1833.7,.465,.054,7840./
C
       HIF=.595
       HIQ=.637
       VF=.796
       VQ=.796
```

```
      TFFI=283.
      TFQmax=433.
      TFQI=383.
      TO=323.
      TD=(TFQI-TO)+(TO-TFFI)
      AUXFI=4.*AMFF/(6.28*RI)
      AUXFQ=4.*AMFQ/(6.28*RO)
      TI=5.0
      TFI=100000.
      DT=.1
      M=11
      N=11
      kont=80
      a=.5
      p=600.
      w=6.2832/p
      ANX=FLOAT(M)
      ANR=FLOAT(N)
      L=2
      NT=20000
      TR=0.
      TFF1(1)=0.
      TFF(1)=0.
      TFQN(1)=1.
      TFQ(1)=1.
      S2=RO-RI
      S=ANR-1.
      ALFA=AKM/(CM*DM)
      S1=((S**2)*ALFA)/(2.*S2)
      QMAX=DM*CM*3.1416*(RO**2-RI**2)*XL*TD
      write(*,*)'          qmax= ',qmax
      DQSFF=6.28*RO*HIF*XL/(AMFF*CFF*(ANX-1.))
      DQSFQ=6.28*RI*HIQ*XL/(AMFQ*CFQ*(ANX-1.))
      U=RI/RO
      AFF=(((ANX-1.)/XL)**2)*ALFA
      AFQ=(((ANX-1.)/XL)**2)*ALFA
      BFF=(((ANR-1.)/(RO-RI))**2)*ALFA
      BFQ=(((ANR-1.)/(RO-RI))**2)*ALFA
C     CFF=(HIF*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
C      CFQ=(HIQ*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
      WRITE(*,3)DQSff,ALFA,U,Aff,Bff,Cff
      write (*,3)DQSfq,ALFA,u,afq,bfq,cfq
C
C...  DISTRIBUICAO E IMPRESSAO DA TEMPERATURA INICIAL
C
      WRITE(*,13)TR
      WRITE(*,33)(LX,LX=1,N)
      DO 10 I=1,M
      tff(i+1)=0.
      tfq(i)=1.
      DO 11 J=1,N
      TM(I,J)=0.4
11    CONTINUE
      WRITE(*,23)I,TFq(I),(TM(I,JX),JX=1,N),TFf(I)
10    CONTINUE
C
C...  MONTAGEM DAS TABELAS
C
      DO 20 KK=1,NT
      if(kk.gt.5.and.kk.lt.3005)then
                t = t + DT
                tfqn(1) = (1 + a*sin(w*t))
      endif
      XKK=FLOAT(KK)
      TR=XKK*TI
      WRITE(*,13)TR
```

```
      WRITE(*,33)(LL,LL=1,N)
      DO 30 K=1,L
      DO 40 J=1,N
      IF(J.EQ.N)GOTO 19
      IF(J.NE.1)GOTO 29
C
C...  CALCULO DA TEMP. DO MATERIAL E DO LADO INTERNO ( Fluido quente )
C
      if(tfq(2).le.tm(2,1))stop
      TM(M+1,1)=TM(M,1)
      TM(M+2,1)=TM(M,1)
      CALL HC(AMFQ,RI,TFQ,TM,TD,TO,XL,AUXFQ,M,N,TBFQ,TPQ,
     * REFQ,NUFQ,HIFQ1,CPFQ,KFQ,PRFQ,CFFQ1,DFFQ)
      DO 50 I=1,M
      CTFQ=(HIFQ1(I)*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
      TM1(I,J)=TM(I,J)+DT*ABS(AFQ*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+TM
     * (I+2,J))+BFQ*(TM(I,J+2)-2.*TM(I,J+1)+TM(I,J))-CTFQ*
     * (TFQ(I)-TM(I,J)))
      DQSQ1=6.28*RI*HIQ*XL/(AMFQ*CFFQ1(I)*(ANX-1.))
      TFQN(I+1)=DQSQ1*(TM1(I,J)-TFQ(I))+TFQ(I)
50    CONTINUE
      GO TO 40
C
C...  DISTRIBUICAO DE TEMPERATURA DENTRO DO MATERIAL
C
29    XJ=FLOAT(J-1)
      D=S1/(RI*S+S2*XJ)
      TM(M+1,J)=TM(M,J)
      TM(M+2,J)=TM(M,J)
      DO 60 I=1,M
            absolu = ABS(AFQ*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+
     * TM(I+2,J))+BFQ*(TM(I,J+1)-2.*TM(I,J)+TM(I,J-1))
     * +D*(TM(I,J+1)-TM(I,J-1)))
      TM1(I,J) = TM(I,J) + DT * absolu
60    continue
      GO TO 40
C
C...  CALCULO DA TEMPERATURA DO LADO EXTERNO ( Fluido Frio )
C
19    TM(M+1,J)=TM(M,N)
      TM(M+2,J)=TM(M,N)
      CALL HC(AMFF,RO,TFF,TM,TD,TO,XL,AUXFF,M,N,TBFF,TPF,
     * REFF,NUFF,HIFF1,CPFF,KFF,PRFF,CFFF1,DFFF)
      DO 140 I=M,1,-1
         CTF=(HIFF1(I)*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
         TM1(I,J)=TM(I,J)+DT*ABS(AFF*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+TM
     *           (I+2,J))+BFF*(TM(I,J)-2.*TM(I,J-1)+TM(I,J-2))-CTF*
     *           (TFF(I)-TM(I,J)))
        DQSF1=6.28*RO*HIF*XL/(AMFF*CFFF1(I)*(ANX-1.))
       TFF1(I-1)=DQSF1*(TM1(I,J)-TFF(I))+TFF(I)
 140  CONTINUE
40    CONTINUE
 30    continue
      DO 230 K=1,L
      CALL CALOR(TD,TO,N,XL,RI,S2,S,TM1,ANX,DM,CM,M,QPX)
      QPE(K)=QPX
230   CONTINUE
      SOMATM=0.
      DO 130 I=1,M
      TFF(I)=TFf1(I)
      TFQ(I)=TFqN(I)
            DO 130 J=1,N
        TM(I,J)=TM1(I,J)
      SOMATM=SOMATM+TM(I,J)
130   CONTINUE
      TMMED=SOMATM/121
```

```
C
C...   CALCULO DO DESEMPENHO
C
       if(KK.ge.8)then
       QFFQ=AMFQ*CFQ*((TFQ(1)-TFQ(11))*TD+TFFI)
       QRFF=AMFF*CFF*((TFF(1)-TFF(11))*TD+TFFI)
       QTAX=AMFF*CFF*((TFQ(1)-TFF(11))*TD+TFFI)
       DES=ABS((QFFQ-QRFF)/QFFQ)*100
       EFE=ABS(QFFQ*100/QTAX)
       endif
C
C...   CALCULO DO CALOR ARMAZENADO
C
       Q(KK)=QPE(L)*100./QMAX
C
       zkk=kk*dt
       IF(KK.LE.40.OR.KK.GT.19960) THEN
         WRITE(1,888)ZKK,Q(KK),EFE,DES
         write(2,999)ZKK,TFF(1),TFQ(1),TMMED
         write(3,777)ZKK,Q(KK)
       ELSE
        IF(KK.EQ.KONT) THEN
         WRITE(1,888)ZKK,Q(KK),EFE,DES
         write(2,999)ZKK,TFF(1),TFQ(1),TMMED
         write(3,777)ZKK,Q(KK)
         KONT=KONT+40
        ENDIF
       ENDIF
C
C....  IMPRESSAO DOS RESULTADOS
c
       write(*,*)kk
       DO 90 I=1,M
       WRITE(*,23)I,TFQ(I),(TM(I,JZ),JZ=1,N),TFF(I)
90     CONTINUE
       WRITE(*,43)Q(KK)
       WRITE(*,63)des
       write(*,73)efe
       write(*,83)TMmed
20     CONTINUE
3      FORMAT(3X,'DQS=',2X,F15.8,/3X,'ALFA',2X,F15.8,
     */3X,'U=',2X,F15.8,/3X,'A=',2X,F15.8,/3X,'B=',2X
     *,F15.8,/3X,'C=',2X,F15.8,/)
13     FORMAT(/////7X,'NO INSTANTE=',2X,F9.3,1X,'SEG',
     *///40X,'TEMPERATURA DO MATERIAL',/)
C
23     FORMAT(1X,I2,2X,F6.4,3X,11(F6.4),3X,F6.4)
33     FORMAT(//8X,'TFQ',7X,11(I2,4X),2X,'TFF')
43     FORMAT(//3X,'CALOR ARMAZENADO=',F10.4)
C
53     FORMAT(3X,I2,2X,5(E9.3))
63     FORMAT(6X,'DESEMPENHO=',F11.4)
73     FORMAT(8X,'EFETIVIDADE=',F11.4)
83     FORMAT(10X,'TMmed=',F11.4)
999    FORMAT(1X,F10.4,3(1X,F6.4))
888    format(1x,f10.4,3(1x,f10.4))
777    format(1x,f10.4,1x,f10.4)
       STOP
       END
C.........................
C...   SUBROTINA  HC
C
       SUBROUTINE HC(AMF,RI,TF,TM,TD,TQ,XL,AJX,M,N,
     *  TBF,TP,RE,NU,HI1,CP,KF,PR,GF1,DF)
       implicit double precision (a-h,o-z)
       REAL NI(12),MIFP(12),MIF(12),(F(12),NU(12)
```

```
      DIMENSION TFX(12),TMXR(12,12),TBF(12),TP(12),
     *  RE(12),HI1(12),CP(12),PR(12),CF1(12),DF(12),TF(12),TM(12,1)
      TFFI=283.
      DO 10 II=1,M
      TFX(II)=TF(II)*TD+TFFI
      TMXR(II,1)=TM(II,1)*TD+TFFI
10    CONTINUE
      TFX(M+1)=TFX(M)
      TMXR(M+1,1)=TMXR(M,1)
      DO 20 II=1,M
      TBF(II)=(TFX(II)+TFX(II+1))/2.
      TP(II)=(TMXR(II,1)+TMXR(II+1,1))/2.
      NI(II)=(72.72-1.135*TBF(II)+.646E-2*TBF(II)**2.)*1.E-6
      RE(II)=AUX/NI(II)
      MIFP(II)=(.06836-.1053E-2*TP(II)+.4104E-5*TP(II)**2)
      MIF(II)=(.06836-.1053E-2*TBF(II)+.4101E-5*TBF(II)**2)
      CP(II)=1.838+.003699*TBF(II)
      DF(II)= 903.-.6706*TBF(II)
      KF(II)=(.1394-.9661E-4*TBF(II))*1.E-3
      CF1(II)=CP(II)*DF(II)
      PR(II)=CP(II)*MIF(II)/KF(II)
      zzz=re(ii)*pr(ii)
      Z1=zzz**.333
      Z2=(2.*RI/XL)**.333
      Z3=(MIF(II)/MIFP(II))**.14
      NU(II)=7.2*Z1*Z2*Z3
      HI1(II)=NU(II)*KF(II)/(2.*RI)
20    CONTINUE
      RETURN
      END
C.....................
C...  SUBROTINA CALOR
C
      SUBROUTINE CALOR(TD,TO,N,XL,RI,S2,S,TM1,ANX,DM,CM,M,QPX)
      implicit double precision (a-h,o-z)
      DIMENSION VT(12),STMXR(12),TM1(12,12),STM(12),QP(13)
      REAL KT(12,12)
      TFFI=283.
C      to=321.
      DO 10 JA=1,N
      DO 10 II=1,M
      KT(II,JA)=TM1(II,JA)*TD+TFFI
C      write(*,*)'kt=',kt(ii,ja)
10    CONTINUE
      NN=N-1
      VT(1)=XL*3.1416*((RI+S2/S)**2-RI**2)
      DO 700 JC=2,NN
      KJC=JC-1
      XJC=FLOAT(KJC)
      XIJ=FLOAT(JC)
      VT(JC)=XL*3.1416*((RI+XIJ*S2/S)**2-(RI+XJC*S2/S)**2)
700   CONTINUE
      DO 710 JC=1,N
      STMXR(JC)=80.
      DO 710 IC=1,M
      STMXR(JC)=KT(IC,JC)+STMXR(JC)
710   CONTINUE
C      STM(1)=TO
      STM(1)=(STMXR(1)+STMXR(2))/(2.*ANX)
      QP(1)=VT(1)*ABS(STM(1)-TO)*DM*CM
C      write(*,*)'stm(1)=',stm(1) ,  'qp(1)=',qp(1)
C      QP(1)=0.
      DO 720 JC=2,NN
      STM(JC)=(STMXR(JC)+STMXR(JC+1))/(2.*ANX)
      QP(JC)=VT(JC)*ABS(STM(JC)-TO)*DM*CM+QP(JC-1)
C      write(*,*)'stm(jc)=',stm(jc),  'vt(jc)=',vt(jc)
```

```
720       CONTINUE
          QPX=QP(NN)
          RETURN
          END

C:\FORTRAN>
```

```
mee  type mevar3.for
C1234567890.........2.........3.........4.........5.........6.........7.........

      implicit double precision (a-h,o-z)
      DIMENSION TM1(13,11),TM(13,11),TFF1(12),TFF(12),QPE(200),
     *  HI1(12),CF1(12),TBFQ(12),TBFF(12),TMXR(12,12),
     *  CP(12),PR(12),DF(12),STMXR(12),STM(12),VI(12),Q(5040),
     *  TFQN(12),TFQ(12),TPF(12),TPQ(12),REFF(12),REFQ(12),DFFQ(12),
     *  HIFF1(12),HIFQ1(12),RE(12),TBF(12),TP(12),TF(12),CPFQ(12),
     *  CPFF(12),PRFF(12),PRFQ(12),CFFQ1(12),CFFF1(12),DFFF(12)

      REAL NU(12),KF(12),NI(12),MIF(12),MIFP(12),KT(12,12),NUFQ(12)
      REAL KFF(12),KFQ(12),NUFF(12)
      open(unit=1,file='arqporv3.dat',status='new')
      open(unit=2,file='arqtemv3.dat',status='new')
      open(unit=3,file='arqcalv3.dat',status='new')
C.....
C
C                    PROGRAMA     MEVAR3
C.....
C
C...  LISTA  DE  VARIAVEIS
C
C     RI      : Raio interno do tubo  (m)
C     RO      : Raio externo do tubo  (m)
C     XL      : Comprimento do tubo   (m)
C     CM      : Calor especifico do material (kj/kg*c)
C     AKM     : Condutividade termica do material (kj/s*m*c)
C     DM      : Densidade do material (kg/m**3)
C     CPFF    : Calor especifico do fluido frio (kj/kg*c)
C     CPFQ    : Calor especifico do fluido quente (kj/kg*c)
C     HIF     : Coeficiente de conveccao interno  (kw/m**2*c)
C     HIQ     : Coeficiente de conveccao externo  (kw/m**2*c)
C     VFF     : Velocidade do fluido frio (m/s)
C     VFQ     : Velocidade do fluido quente (m/s)
C     CFF     : Valor inicial do calor especifico do fluido frio (kj/kg*c)
C     CFQ     : Valor inicial do calor especifico do fluido quente (kj/kg*c)
C     AMFF    : Massa do fluido frio escoando  (kg/s)
C     AMFQ    : Massa do fluido quente escoando (kg/s)
C     TFF     : Temperatura do fluido frio  (K)
C     TFQ     : Temperatura do fluido quente (K)
C     TM      : Temperatura do material (K)
C     TFFI    : Temperatura do fluido frio  na entrada do tubo no tempo zero (K)
C     TFQI    : Temperatura do fluido quente na entrada do tubo no tempo zero (K)
C     TO      : Temperatura do material no tempo zero (K)
C     TI      : Intervalo de tempo entre a impressao de duas tabelas (s)
C     TFI     : Tempo final de impressao (s)
C     DT      : Incremento de tempo (s)
C     M       : Numero de estacoes no comprimento do tubo
C     N       : Numero de divisoes do raio do tubo
C     TPF     : Temperatura da parede fria     (K)
C     TPQ     : Temperatura da parede quente   (K)
C     REFF    : Reynolds do fluido frio
C     REFQ    : Reynolds do fluido quente
C     DFFQ    : Diferenca de temperatura do fluido quente (K)
C     DTFF    : Diferenca de temperatura do fluido frio   (K)
C
C.....
C
C...   DADOS DE ENTRADA
C
       DATA RI,RO,XL,AMFF,AMFQ,CFF,CFQ,CM,AKM,DM/,014,.042,1.08,.000164,
     *.0005,4180.7,1833.7,.465,.054,7840./
C
```

```
      HIF=.595
      HIQ=.637
      VF=.796
      VQ=.796
      TFFI=283.
      TFQmax=433.
      TFQI=383.
      TO=323.
      TD=(TFQI-TO)+(TO-TFFI)
      AUXFI=4.*AMFF/(6.28*RI)
      AUXFQ=4.*AMFQ/(6.28*RO)
      TI=5.0
      TFI=25000.
      DT=.1
      M=11
      N=11
      kont=60
      a=.5
      p=600.
      w=6.2832/p
      ANX=FLOAT(M)
      ANR=FLOAT(N)
      L=2
      NT=5000
      TR=0.
      TFF1(1)=0.
      TFF(1)=0.
      TFQN(1)=1.
      TFQ(1)=1.
      S2=RO-RI
      S=ANR-1.
      ALFA=AKM/(Cm*DM)
      S1=((S**2)*ALFA)/(2.*S2)
      QMAX=DM*CM*3.1416*(RO**2-RI**2)*XL*TD
      write(*,*)'          qmax= ',qmax
      DQSFF=6.28*RO*HIF*XL/(AMFF*CFF*(ANX-1.))
      DQSFQ=6.28*RI*HIQ*XL/(AMFQ*CFQ*(ANX-1.))
      U=RI/RO
      AFF=(((ANX-1.)/XL)**2)*ALFA
      AFQ=(((ANX-1.)/XL)**2)*ALFA
      BFF=(((ANR-1.)/(RO-RI))**2)*ALFA
      BFQ=(((ANR-1.)/(RO-RI))**2)*ALFA
C     CFF=(HIF*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
C      CFQ=(HIQ*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
      WRITE(*,3)DQSff,ALFA,U,Aff,Bff,Cff
      write (*,3)DQSfq,ALFA,u,afq,bfq,cfq
C
C...  DISTRIBUICAO E IMPRESSAO DA TEMPERATURA INICIAL
C
      WRITE(*,13)TR
      WRITE(*,33)(LX,LX=1,N)
      DO 10 I=1,M
      tff(i+1)=0.
      tfq(i)=1.
      DO 11 J=1,N
      TM(I,J)=0.4
11    CONTINUE
      WRITE(*,23)I,TFq(I),(TM(I,JX),JX=1,N),TFF(I)
10    CONTINUE
C
C...  MONTAGEM DAS TABELAS
C
      DO 20 KK=1,NT
      if(kk.gt.5.and.kk.lt.3005)then
            t = t + DT
            tfqn(1) = (1 + a*sin(w*t))
```

```
          endif
          XKK=FLOAT(KK)
          TR=XKK*TI
          WRITE(*,13)TR
          WRITE(*,33)(LL,LL=1,N)
          DO 30 K=1,L
          DO 40 J=1,N
          IF(J.EQ.N)GOTO 19
          IF(J.NE.1)GOTO 29
C
C...    CALCULO DA TEMP. DO MATERIAL E DO LADO INTERNO ( Fluido Quente )
C
          if(tfq(2).le.tm(2,1))stop
          TM(M+1,1)=TM(M,1)
          TM(M+2,1)=TM(M,1)
          CALL HC(AMFQ,RI,TFQ,TM,TD,TO,XL,AUXFQ,M,N,TSFQ,TPQ,
      *   REFQ,NUFQ,HIFQ1,CPFQ,KFQ,PRFQ,CFFQ1,DFFQ)
          DO 50 I=1,M
          CTFQ=(HIFQ1(I)*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
          TM1(I,J)=TM(I,J)+DT*ABS(AFQ*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+TM
      *   (I+2,J))+BFQ*(TM(I,J+2)-2.*TM(I,J+1)+TM(I,J))-CTFQ*
      *   (TFQ(I)-TM(I,J)))
          DQSQ1=6.28*RI*HIQ*XL/(AMFQ*CFFQ1(I)*(ANX-1.))
          TFQN(I+1)=DQSQ1*(TM1(I,J)-TFQ(I))+TFQ(I)
50        CONTINUE
          GO TO 40
C
C...    DISTRIBUICAO DE TEMPERATURA DENTRO DO MATERIAL
C
29        XJ=FLOAT(J-1)
          D=S1/(RI*S+S2*XJ)
          TM(M+1,J)=TM(M,J)
          TM(M+2,J)=TM(M,J)
          DO 60 I=1,M
                absolu = ABS(AFQ*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+
      *   TM(I+2,J))+BFQ*(TM(I,J+1)-2.*TM(I,J)+TM(I,J-1))
      *   +D*(TM(I,J+1)-TM(I,J-1)))
          TM1(I,J) = TM(I,J) + DT * absolu
60        continue
          GO TO 40
C
C...    CALCULO DA TEMPERATURA DO LADO EXTERNO ( Fluido Frio )
C
19        TM(M+1,J)=TM(M,N)
          TM(M+2,J)=TM(M,N)
          CALL HC(AMFF,RO,TFF,TM,TD,TO,XL,AUXFF,M,N,TSFF,TPF,
      *   REFF,NUFF,HIFF1,CPFF,KFF,PRFF,CFFF1,DFFF)
          DO 140 I=M,1,-1
             CTF=(HIFF1(I)*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
             TM1(I,J)=TM(I,J)+DT*ABS(AFF*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+TM
      *                (I+2,J))+BFF*(TM(I,J)-2.*TM(I,J-1)+TM(I,J-2))-CTF*
      *              (TFF(I)-TM(I,J)))
             DQSF1=6.28*RO*HIF*XL/(AMFF*CFFF1(I)*(ANX-1.))
            TFF1(I-1)=DQSF1*(TM1(I,J)-TFF(I))+TFF(I)
  140     CONTINUE
40        CONTINUE
   30      continue
          DO 230 K=1,L
          CALL CALOR(TD,TO,N,XL,RI,S2,S,TM1,ANX,DM,CM,M,QPX)
          QPE(K)=QPX
 230      CONTINUE
          SOMATM=0.
          DO 130 I=1,M
          TFF(I)=TFf1(I)
          TFQ(I)=TFqN(I)
                DO 130 J=1,N
```

```
            TM(I,J)=TM1(I,J)
          SOMATM=SOMATM+TM(I,J)
130       CONTINUE
          TMMED=SOMATM/121
C
C...    CALCULO DO DESEMPENHO
C
          if(KK.ge.8)then
          QFFQ=AMFQ*CFQ*((TFQ(1)-TFQ(11))*TD+TFFI)
          QRFF=AMFF*CFF*((TFF(1)-TFF(11))*TD+TFFI)
          QTAX=AMFF*CFF*((TFQ(1)-TFF(11))*TD+TFFI)
          DES=ABS((QFFQ-QRFF)/QFFQ)*100
          EFE=ABS(QFFQ*100/QTAX)
          endif
C
C...    CALCULO DO CALOR ARMAZENADO
C
          Q(KK)=QPE(L)*100./QMAX
C
          zkk=kk*dt
          IF(KK.LE.40.OR.KK.GT.2800) THEN
            WRITE(1,888)ZKK,Q(KK),EFE,DES
            write(2,999)ZKK,TFF(1),TFQ(1),TMMED
            write(3,777)ZKK,Q(KK)
          ELSE
           IF(KK.EQ.KONT) THEN
            WRITE(1,888)ZKK,Q(KK),EFE,DES
            write(2,999)ZKK,TFF(1),TFQ(1),TMMED
            write(3,777)ZKK,Q(KK)
            KONT=KONT+20
           ENDIF
          ENDIF
C
C....   IMPRESSAO DOS RESULTADOS
c
          write(*,*)kk
c         DO 90 I=1,M
c         WRITE(*,23)I,TFQ(I),(TM(I,JZ),JZ=1,N),TFF(I)
c90       CONTINUE
c         WRITE(*,43)Q(KK)
c          WRITE(*,63)des
c          write(*,73)efe
c          write(*,83)TMmed
20        CONTINUE
3         FORMAT(3X,'DQS=',2X,F15.8,/3X,'ALFA',2X,F15.8,
     *,/3X,'U=',2X,F15.8,/3X,'A=',2X,F15.8,/3X,'B=',2X
     *,F15.8,/3X,'C=',2X,F15.8,/)
13        FORMAT(////7X,'NO INSTANTE=',2X,F9.3,1X,'SEG',
     *///40X,'TEMPERATURA DO MATERIAL',/)
C
23        FORMAT(1X,I2,2X,F6.4,3X,11(F6.4),3X,F6.4)
33        FORMAT(//8X,'TFQ',7X,11(I2,4X),2X,'TFF')
43        FORMAT(//3X,'CALOR ARMAZENADO=',F10.4)
C
53        FORMAT(3X,I2,2X,5(E9.3))
63        FORMAT(6X,'DESEMPENHO=',F11.4)
73        FORMAT(8X,'EFETIVIDADE=',F11.4)
83        FORMAT(10X,'TMmed=',F11.4)
999       FORMAT(1X,F10.4,3(1X,F6.4))
888       format(1x,f10.4,3(1x,f10.4))
777       format(1x,f10.4,1x,f10.4)
          STOP
          END
C.........................
C...    SUBROTINA  HC
C
```

```
      SUBROUTINE HC(AMF,RI,TF,TM,TD,TO,XL,AUX,N,M,
     *  TBF,TP,RE,NU,HI1,CP,KF,PR,CF1,DF)
      implicit double precision (a-h,o-z)
      REAL NI(12),MIFP(12),MIF(12),KF(12),NU(12)
      DIMENSION TFX(12),TMXR(12,12),TBF(12),TP(12),
     *  RE(12),HI1(12),CP(12),PR(12),CF1(12),DF(12),TF(12),TM(12,1)
      TFFI=283.
      DO 10 II=1,M
      TFX(II)=TF(II)*TD+TFFI
      TMXR(II,1)=TM(II,1)*TD+TFFI
10    CONTINUE
      TFX(M+1)=TFX(M)
      TMXR(M+1,1)=TMXR(M,1)
      DO 20 II=1,M
      TBF(II)=(TFX(II)+TFX(II+1))/2.
      TP(II)=(TMXR(II,1)+TMXR(II+1,1))/2.
      NI(II)=(72.72-1.135*TBF(II)+.646E-2*TBF(II)**2.)*1.E-6
      RE(II)=AUX/NI(II)
      MIFP(II)=(.06836-.1053E-2*TP(II)+.4104E-5*TP(II)**2)
      MIF(II)=(.06836-.1053E-2*TBF(II)+.4101E-5*TBF(II)**2)
      CP(II)=1.838+.003699*TBF(II)
      DF(II)= 903.-.6706*TBF(II)
      KF(II)=(.1394-.9661E-4*TBF(II))*1.E-3
      CF1(II)=CP(II)*DF(II)
      PR(II)=CP(II)*MIF(II)/KF(II)
      zzz=re(ii)*pr(ii)
      Z1=zzz**.333
      Z2=(2.*RI/XL)**.333
      Z3=(MIF(II)/MIFP(II))**.14
      NU(II)=7.2*Z1*Z2*Z3
      HI1(II)=NU(II)*KF(II)/(2.*RI)
20    CONTINUE
      RETURN
      END
C.........................
C...   SUBROTINA CALOR
C
      SUBROUTINE CALOR(TD,TO,N,XL,RI,S2,S,TML,ANX,DM,CM,M,QPX)
      implicit double precision (a-h,o-z)
      DIMENSION VT(12),STMXR(12),TM1(12,12),STM(12),QP(13)
      REAL KT(12,12)
      TFFI=283.
C      to=321.
      DO 10 JA=1,N
      DO 10 II=1,M
      KT(II,JA)=TM1(II,JA)*TD+TFFI
C      write(*,*)'kt=',kt(ii,ja)
10    CONTINUE
      NN=N-1
      VT(1)=XL*3.1416*((RI+S2/S)**2-RI**2)
      DO 700 JC=2,NN
      KJC=JC-1
      XJC=FLOAT(KJC)
      XIJ=FLOAT(JC)
      VT(JC)=XL*3.1416*((RI+XIJ*S2/S)**2-(RI+XJC*S2/S)**2)
700   CONTINUE
      DO 710 JC=1,N
      STMXR(JC)=80.
      DO 710 IC=1,M
      STMXR(JC)=KT(IC,JC)+STMXR(JC)
710   CONTINUE
C      STM(1)=TO
      STM(1)=(STMXR(1)+STMXR(2))/(2.*ANX)
      QP(1)=VT(1)*ABS(STM(1)-TO)*DM*CM
C      write(*,*)'stm(1)=',stm(1) ,   'qp(1)=',qp(1)
C      QP(1)=0.
```

```
      DO 720 JC=2,NN
      STM(JC)=(STMXP(JC)+STMXR(JC+1))/(2.*ANX)
      QP(JC)=VT(JC)*ABS(STM(JC)-T0)*DM*CM+QP(JC-1)
C      write(*,*)'stm(jc)=',stm(jc),  'vt(jc)=',vt(jc)
720   CONTINUE
      QPX=QP(NN)
      RETURN
      END

C:\FORTRAN)
```

APÊNDICE B

```
cosns1
        qmax=          727.31244378215000
DQS=          .01648032
ALFA          .00001481
U=          .50000000
A=          .00126992
B=         7.55733465
C=      4180.70019531

DQS=          .00659709
ALFA          .00001481
U=          .50000000
A=          .00126992
B=         7.55733465
C=      1833.69995117



   NO INSTANTE=         .000 SEG

                                TEMPERATURA DO MATERIAL

    TFQ          1       2       3       4       5       6       7       8       9      10      11          TFF
 1.0000      .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000      .0000
 1.0000      .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000      .0000
 1.0000      .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000      .0000
 1.0000      .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000      .0000
 1.0000      .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000      .0000
 1.0000      .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000      .0000
 1.0000      .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000      .0000
 1.0000      .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000      .0000
 1.0000      .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000      .0000
 1.0000      .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000   .4000      .0000
```

NO INSTANTE= 485.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ 97	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
.0000	.4276	.4247	.4226	.4206	.4192	.4176	.4169	.4162	.4159	.4154	.4156	.1194
.9967	.4280	.4251	.4229	.4210	.4193	.4177	.4171	.4164	.4160	.4156	.4157	.1093
.9934	.4278	.4249	.4228	.4209	.4192	.4176	.4170	.4163	.4159	.4155	.4156	.0987
.9902	.4272	.4244	.4223	.4203	.4189	.4174	.4166	.4159	.4156	.4152	.4154	.0873
.9869	.4271	.4242	.4222	.4203	.4188	.4173	.4166	.4159	.4156	.4151	.4153	.0766
.9837	.4269	.4241	.4220	.4201	.4187	.4172	.4165	.4158	.4155	.4151	.4152	.0649
.9805	.4267	.4239	.4219	.4200	.4186	.4171	.4164	.4157	.4154	.4150	.4151	.0528
.9773	.4266	.4238	.4218	.4199	.4185	.4170	.4163	.4156	.4153	.4149	.4150	.0403
.9741	.4264	.4237	.4217	.4198	.4184	.4169	.4162	.4155	.4152	.4148	.4149	.0273
.9710	.4262	.4235	.4215	.4196	.4183	.4168	.4161	.4154	.4151	.4147	.4148	.0139
.9678	.4261	.4234	.4214	.4195	.4182	.4167	.4160	.4153	.4150	.4146	.4148	.0000

OR ARMAZENADO= 2.0488
DESEMPENHO= 22.9391
EFETIVIDADE= 99.9320
TMmed= .4189

NO INSTANTE= 48270.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ 9654	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
1.0000	.9919	.9918	.9918	.9918	.9917	.9917	.9917	.9917	.9917	.9917	.9917	.2850
1.0000	.9917	.9917	.9917	.9916	.9916	.9916	.9916	.9916	.9915	.9915	.9916	.2607
.9999	.9915	.9915	.9915	.9914	.9914	.9914	.9914	.9914	.9914	.9914	.9914	.2356
.9999	.9913	.9913	.9912	.9912	.9912	.9912	.9911	.9911	.9911	.9911	.9911	.2096
.9998	.9911	.9910	.9910	.9910	.9910	.9909	.9909	.9909	.9909	.9909	.9909	.1827
.9998	.9909	.9909	.9908	.9908	.9908	.9908	.9907	.9907	.9907	.9907	.9907	.1548
.9997	.9907	.9906	.9906	.9906	.9905	.9905	.9905	.9905	.9905	.9905	.9905	.1259
.9997	.9905	.9905	.9904	.9904	.9904	.9903	.9903	.9903	.9903	.9903	.9903	.0961
.9996	.9902	.9902	.9901	.9901	.9901	.9901	.9900	.9900	.9900	.9900	.9900	.0652
.9995	.9901	.9901	.9901	.9900	.9900	.9900	.9900	.9899	.9899	.9899	.9899	.0331
.9995	.9898	.9898	.9898	.9897	.9897	.9897	.9897	.9896	.9896	.9896	.9896	.0000

CALOR ARMAZENADO= 49.6270
DESEMPENHO= 17.7022
EFETIVIDADE= 98.8259
TMmed= .9908

APÊNDICE C

qmax= 1272.7966959040000

DQS= .02060040
ALFA .00001481
U= .40000001
A= .00126992
B= 3.35881570
C= 4180.70019531

DQS= .00659709
ALFA .00001481
U= .40000001
A= .00126992
B= 3.35881570
C= 1833.69995117

NO INSTANTE= .000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000

NO INSTANTE= 25.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
1.0000	.4018	.4007	.4002	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0769
.9966	.4017	.4007	.4002	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0769
.9931	.4017	.4007	.4002	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0769
.9897	.4017	.4007	.4002	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0769
.9863	.4017	.4007	.4002	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0769
.9830	.4017	.4007	.4002	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0769
.9830	.4017	.4007	.4002	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0628
.9830	.4017	.4007	.4002	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0481
.9830	.4017	.4007	.4002	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0328
.9830	.4017	.4007	.4002	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0167
.9830	.4017	.4007	.4002	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000

NO INSTANTE= 41625.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
8325												
1.0000	.8624	.8605	.8589	.8577	.8568	.8561	.8555	.8552	.8550	.8549	.8550	.3149
.9992	.8613	.8593	.8578	.8566	.8556	.8549	.8544	.8540	.8538	.8537	.8538	.3139
.9984	.8601	.8581	.8566	.8554	.8544	.8537	.8532	.8528	.8526	.8526	.8526	.2833
.9976	.8590	.8570	.8555	.8542	.8533	.8526	.8520	.8517	.8515	.8514	.8515	.2506
.9968	.8578	.8558	.8543	.8531	.8521	.8514	.8508	.8505	.8503	.8502	.8503	.2246
.9960	.8567	.8547	.8532	.8520	.8510	.8503	.8497	.8494	.8492	.8491	.8492	.2016
.9952	.8554	.8535	.8519	.8507	.8497	.8490	.8485	.8481	.8479	.8478	.8479	.1672
.9944	.8545	.8525	.8510	.8497	.8488	.8481	.8475	.8472	.8469	.8469	.8469	.1299
.9936	.8531	.8511	.8495	.8483	.8473	.8466	.8460	.8457	.8454	.8454	.8454	.0926
.9928	.8524	.8505	.8489	.8477	.8467	.8460	.8455	.8451	.8449	.8448	.8449	.0624
.9920	.8509	.8490	.8474	.8462	.8452	.8444	.8439	.8435	.8433	.8433	.8433	.0000

CALOR ARMAZENADO= 37.7756
DESEMPENHO= 16.4546
EFETIVIDADE= 99.0879
TMmed= .8513

NO INSTANTE= 44640.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
8928												
.0000	.9162	.9155	.9149	.9144	.9140	.9137	.9135	.9133	.9132	.9132	.9132	.3149
.9995	.9153	.9145	.9139	.9134	.9130	.9127	.9125	.9124	.9123	.9122	.9123	.2890
.9990	.9143	.9136	.9130	.9125	.9121	.9118	.9115	.9114	.9113	.9113	.9113	.2620
.9985	.9134	.9126	.9120	.9115	.9111	.9108	.9106	.9104	.9104	.9103	.9104	.2339
.9981	.9124	.9117	.9110	.9105	.9102	.9098	.9096	.9095	.9094	.9094	.9094	.2046
.9976	.9115	.9107	.9101	.9096	.9092	.9089	.9087	.9085	.9084	.9084	.9084	.1740
.9971	.9105	.9097	.9091	.9086	.9082	.9079	.9077	.9075	.9074	.9074	.9074	.1421
.9966	.9097	.9089	.9083	.9078	.9074	.9071	.9068	.9067	.9066	.9066	.9066	.1088
.9961	.9085	.9078	.9071	.9066	.9062	.9059	.9057	.9055	.9054	.9054	.9054	.0741
.9956	.9080	.9072	.9066	.9061	.9057	.9054	.9051	.9050	.9049	.9049	.9049	.0379
.9951	.9068	.9060	.9053	.9048	.9044	.9041	.9039	.9037	.9036	.9036	.9036	.0000

OR ARMAZENADO= 42.7152
DESEMPENHO= 17.0432
EFETIVIDADE= 98.9808
TMmed= .9093

APÊNDICE D

qmax= 1939.49965655360000
S= .02472048
FA .00001481
.33333335
.00126992
1.88933391
4180.70019531

S= .00659709
FA .00001481
.33333335
.00126992
1.88933391
1833.69995117

NO INSTANTE= .000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000

NO INSTANTE= 25.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
1.0000	.4018	.4005	.4001	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0908
.9966	.4018	.4005	.4001	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0908
.9931	.4018	.4005	.4001	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0908
.9897	.4018	.4005	.4001	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0908
.9863	.4018	.4005	.4001	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0908
.9830	.4018	.4005	.4001	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0908
.9830	.4018	.4005	.4001	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0745
.9830	.4018	.4005	.4001	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0572
.9830	.4018	.4005	.4001	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0392
.9830	.4018	.4005	.4001	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0201
.9830	.4018	.4005	.4001	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000

NO INSTANTE= 12120.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
1.0000	.6201	.6146	.6103	.6068	.6041	.6021	.6006	.5995	.5990	.5988	.5990	.2385
.9978	.6191	.6136	.6093	.6058	.6032	.6011	.5996	.5986	.5980	.5978	.5980	.2197
.9956	.6181	.6126	.6083	.6049	.6022	.6002	.5987	.5976	.5971	.5969	.5971	.1999
.9935	.6171	.6116	.6073	.6039	.6013	.5992	.5977	.5967	.5961	.5959	.5961	.1791
.9913	.6161	.6106	.6063	.6030	.6003	.5983	.5968	.5958	.5952	.5950	.5952	.1572
.9891	.6151	.6097	.6054	.6020	.5994	.5973	.5958	.5948	.5943	.5941	.5943	.1342
.9870	.6141	.6087	.6044	.6010	.5984	.5964	.5949	.5939	.5933	.5932	.5933	.1100
.9848	.6131	.6077	.6035	.6001	.5975	.5955	.5940	.5930	.5924	.5922	.5924	.0845
.9827	.6121	.6067	.6025	.5992	.5965	.5945	.5931	.5921	.5915	.5913	.5915	.0576
.9806	.6112	.6059	.6016	.5983	.5957	.5937	.5922	.5912	.5907	.5905	.5907	.0296
.9784	.6102	.6048	.6006	.5973	.5947	.5927	.5913	.5903	.5897	.5895	.5897	.0000

ALOR ARMAZENADO= 16.8886
DESEMPENHO= 19.5283
EFETIVIDADE= 99.5612
TMmed= .6002

APÊNDICE E

qmax= 727.31244378215000
= .01648032
A .00001481
.50000000
7.55733465
4180.78019391

= .00659709
A .00001481
.50000000
7.55733465
1833.69995117

NO INSTANTE= .000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	4000	.4000	.0000
1.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000

NO INSTANTE= 1500.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ 300	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	FF
1520	.4857	.4826	.4795	.4774	.4754	.4742	.4727	.4721	.4714	.4714	.4716	.1351
1477	.4875	.4845	.4815	.4796	.4773	.4760	.4748	.4743	.4734	.4734	.4736	.1235
1434	.4870	.4839	.4810	.4791	.4769	.4756	.4743	.4738	.4730	.4730	.4732	.1115
1391	.4844	.4814	.4784	.4763	.4743	.4732	.4717	.4710	.4704	.4704	.4706	.0991
1349	.4839	.4809	.4779	.4758	.4738	.4727	.4712	.4706	.4700	.4700	.4702	.0864
1307	.4834	.4804	.4775	.4754	.4734	.4723	.4708	.4702	.4696	.4696	.4698	.0732
1264	.4827	.4797	.4768	.4747	.4728	.4716	.4702	.4696	.4690	.4689	.4691	.0595
1223	.4822	.4792	.4763	.4743	.4723	.4712	.4698	.4692	.4686	.4686	.4687	.0454
1181	.4817	.4788	.4759	.4738	.4719	.4708	.4694	.4688	.4681	.4681	.4683	.0308
1139	.4810	.4781	.4752	.4732	.4713	.4702	.4687	.4681	.4675	.4675	.4677	.0156
1098	.4803	.4774	.4746	.4726	.4707	.4696	.4682	.4676	.4670	.4670	.4671	.0000

R ARMAZENADO= 6.6322
ESEMPENHO= 22.7999
EFETIVIDADE= 96.4532
TMmed= .4741

NO INSTANTE= 1505.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ 301	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	FF
1525	.4862	.4827	.4800	.4774	.4759	.4745	.4733	.4721	.4719	.4716	.4718	.1352
1482	.4880	.4846	.4821	.4798	.4779	.4760	.4753	.4745	.4740	.4736	.4738	.1236
1439	.4875	.4840	.4816	.4793	.4774	.4756	.4748	.4741	.4736	.4731	.4733	.1115
1396	.4850	.4815	.4789	.4763	.4748	.4735	.4723	.4711	.4709	.4706	.4708	.0992
1354	.4844	.4810	.4784	.4758	.4744	.4730	.4718	.4706	.4704	.4701	.4703	.0864
1312	.4839	.4806	.4779	.4754	.4740	.4726	.4714	.4702	.4700	.4697	.4699	.0732
1269	.4832	.4799	.4773	.4747	.4733	.4720	.4708	.4696	.4694	.4691	.4693	.0595
1227	.4827	.4794	.4768	.4743	.4729	.4715	.4704	.4692	.4690	.4687	.4689	.0454
1186	.4822	.4789	.4763	.4738	.4724	.4711	.4699	.4688	.4686	.4683	.4685	.0308
1144	.4815	.4782	.4757	.4732	.4718	.4705	.4693	.4682	.4680	.4677	.4679	.0156
1103	.4809	.4776	.4751	.4726	.4712	.4699	.4687	.4676	.4674	.4671	.4673	.0000

R ARMAZENADO= 6.6594
ESEMPENHO= 22.7981
EFETIVIDADE= 96.4414
TMmed= .4744

NO INSTANTE= 7475.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ 1495	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
1.5000	.8657	.8622	.8597	.8574	.8555	.8537	.8529	.8521	.8516	.8512	.8514	.2417
1.4963	.8650	.8615	.8589	.8563	.8548	.8534	.8522	.8510	.8508	.8505	.8507	.2308
1.4927	.8630	.8595	.8569	.8543	.8528	.8514	.8502	.8490	.8488	.8485	.8487	.1992
1.4891	.8595	.8560	.8535	.8512	.8494	.8475	.8468	.8459	.8455	.8451	.8453	.1770
1.4854	.8573	.8538	.8514	.8490	.8472	.8454	.8446	.8438	.8433	.8429	.8431	.1541
1.4818	.8551	.8517	.8492	.8469	.8451	.8433	.8425	.8417	.8412	.8408	.8410	.1304
1.4782	.8528	.8494	.8470	.8447	.8428	.8410	.8402	.8394	.8390	.8386	.8388	.1060
1.4746	.8507	.8472	.8448	.8425	.8407	.8389	.8381	.8373	.8369	.8365	.8367	.0808
1.4710	.8486	.8451	.8427	.8404	.8386	.8368	.8360	.8352	.8348	.8344	.8346	.0547
1.4674	.8464	.8430	.8406	.8383	.8365	.8347	.8339	.8331	.8327	.8323	.8325	.0278
1.4638	.8441	.8407	.8383	.8361	.8342	.8324	.8317	.8309	.8304	.8300	.8302	.0000

LOR ARMAZENADO= 37.5183
DESEMPENHO= 19.8567
EFETIVIDADE= 88.5159
TMmed= .8455

NO INSTANTE= 10935.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ 2187	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
1.3778	1.0272	1.0253	1.0239	1.0225	1.0215	1.0205	1.0200	1.0196	1.0193	1.0191	1.0192	.2896
1.3761	1.0261	1.0241	1.0226	1.0212	1.0203	1.0195	1.0188	1.0182	1.0181	1.0179	1.0180	.2646
1.3745	1.0238	1.0218	1.0204	1.0189	1.0181	1.0172	1.0166	1.0159	1.0158	1.0156	1.0157	.2389
1.3728	1.0206	1.0186	1.0172	1.0159	1.0148	1.0138	1.0134	1.0129	1.0126	1.0124	1.0125	.2123
1.3711	1.0182	1.0163	1.0149	1.0135	1.0125	1.0114	1.0110	1.0105	1.0103	1.0100	1.0102	.1848
1.3694	1.0160	1.0140	1.0126	1.0112	1.0102	1.0091	1.0087	1.0082	1.0080	1.0077	1.0079	.1564
1.3677	1.0136	1.0116	1.0102	1.0088	1.0078	1.0067	1.0063	1.0058	1.0055	1.0053	1.0054	.1272
1.3660	1.0113	1.0092	1.0079	1.0065	1.0055	1.0044	1.0040	1.0035	1.0032	1.0030	1.0031	.0969
1.3643	1.0089	1.0069	1.0055	1.0042	1.0031	1.0021	1.0017	1.0012	1.0009	1.0007	1.0008	.0657
1.3625	1.0068	1.0047	1.0034	1.0020	1.0010	.9999	.9995	.9990	.9987	.9985	.9986	.0334
1.3608	1.0043	1.0022	1.0008	.9995	.9984	.9974	.9969	.9965	.9962	.9960	.9961	.0000

LOR ARMAZENADO= 51.2518
DESEMPENHO= 18.0572
EFETIVIDADE= 90.4767
TMmed= 1.0104

APÊNDICE F

S= .02060040
FA .00001481
.40000001
.00126992
3.35881570
4180.70019531

= .00659709
FA .00001481
.40000001
.00126992
3.35881570
1833.69995117

NO INSTANTE= .000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
.0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000

NO INSTANTE= 5.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
1												
.0000	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0167
.9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0167
.9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0167
.9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0167
.9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0167
.9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0167
.9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0167
.9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0167
.9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0167
.9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000

NO INSTANTE= 1005.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
201												
1.1019	.4391	.4333	.4286	.4249	.4220	.4197	.4180	.4169	.4162	.4160	.4162	.1442
1.0976	.4389	.4331	.4284	.4247	.4218	.4196	.4179	.4168	.4161	.4159	.4160	.1324
1.0933	.4386	.4329	.4282	.4246	.4217	.4194	.4178	.4167	.4160	.4158	.4159	.1201
1.0890	.4384	.4326	.4281	.4244	.4215	.4193	.4177	.4165	.4159	.4157	.4158	.1072
1.0848	.4381	.4324	.4279	.4242	.4214	.4192	.4176	.4164	.4158	.4156	.4157	.0938
1.0806	.4378	.4322	.4277	.4241	.4212	.4191	.4174	.4163	.4157	.4155	.4156	.0798
1.0764	.4376	.4320	.4275	.4239	.4211	.4189	.4173	.4162	.4156	.4154	.4155	.0652
1.0722	.4373	.4318	.4273	.4238	.4210	.4188	.4172	.4161	.4155	.4153	.4154	.0500
1.0680	.4371	.4316	.4271	.4236	.4208	.4187	.4171	.4160	.4154	.4152	.4153	.0340
1.0639	.4369	.4314	.4270	.4235	.4207	.4186	.4170	.4159	.4153	.4151	.4152	.0174
1.0598	.4366	.4312	.4268	.4233	.4206	.4184	.4169	.4158	.4152	.4150	.4151	.0000

LOR ARMAZENADO= 2.1815
DESEMPENHO= 22.5603
EFETIVIDADE= 97.6783
TMmed= .4221

NO INSTANTE= 1010.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
202												
.1024	.4393	.4335	.4288	.4251	.4221	.4198	.4182	.4170	.4163	.4161	.4163	.1442
.0981	.4390	.4332	.4286	.4249	.4220	.4197	.4180	.4169	.4162	.4160	.4162	.1324
.0938	.4388	.4330	.4284	.4247	.4218	.4196	.4179	.4168	.4161	.4159	.4161	.1201
.0895	.4385	.4328	.4282	.4246	.4217	.4194	.4178	.4167	.4160	.4158	.4160	.1073
.0853	.4383	.4326	.4280	.4244	.4215	.4193	.4177	.4166	.4159	.4157	.4159	.0939
.0811	.4380	.4324	.4278	.4242	.4214	.4192	.4176	.4165	.4158	.4156	.4158	.0799
.0769	.4378	.4321	.4276	.4241	.4212	.4191	.4175	.4164	.4157	.4155	.4157	.0652
.0727	.4375	.4319	.4275	.4239	.4211	.4189	.4173	.4162	.4156	.4154	.4155	.0500
.0685	.4373	.4317	.4273	.4238	.4210	.4188	.4172	.4161	.4155	.4153	.4154	.0340
.0644	.4370	.4315	.4271	.4236	.4208	.4187	.4171	.4160	.4154	.4152	.4154	.0174
0603	.4368	.4313	.4269	.4234	.4207	.4186	.4170	.4159	.4153	.4151	.4153	.0000

R ARMAZENADO= 2.1930
ESEMPENHO= 22.5596
EFETIVIDADE= 97.6662
TMmed= .4222

NO INSTANTE= 1580.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
316												
1.1600	.4585	.4521	.4469	.4428	.4395	.4370	.4351	.4339	.4331	.4329	.4331	.1498
1.1555	.4581	.4517	.4466	.4425	.4393	.4368	.4349	.4336	.4329	.4327	.4329	.1376
1.1510	.4577	.4514	.4463	.4422	.4390	.4365	.4347	.4334	.4327	.4325	.4327	.1248
1.1465	.4574	.4511	.4460	.4420	.4387	.4363	.4344	.4332	.4325	.4322	.4324	.1114
1.1420	.4570	.4507	.4457	.4417	.4385	.4360	.4342	.4330	.4323	.4320	.4322	.0975
1.1376	.4566	.4504	.4454	.4414	.4382	.4358	.4340	.4328	.4320	.4318	.4320	.0829
1.1332	.4562	.4501	.4451	.4411	.4380	.4356	.4338	.4325	.4318	.4316	.4318	.0677
1.1288	.4559	.4497	.4448	.4409	.4377	.4353	.4335	.4323	.4316	.4314	.4316	.0519
1.1245	.4555	.4494	.4445	.4406	.4375	.4351	.4333	.4321	.4314	.4312	.4314	.0353
1.1202	.4551	.4491	.4442	.4403	.4372	.4349	.4331	.4319	.4312	.4310	.4312	.0180
1.1159	.4548	.4488	.4439	.4401	.4370	.4346	.4329	.4317	.4310	.4308	.4310	.0000

LOR ARMAZENADO= 3.5871
DESEMPENHO= 22.4678
EFETIVIDADE= 96.3248
TMmed= .4391

NO INSTANTE= 1585.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
317												
1.1605	.4587	.4523	.4471	.4430	.4397	.4372	.4353	.4340	.4333	.4330	.4333	.1499
1.1559	.4583	.4519	.4468	.4427	.4394	.4369	.4351	.4338	.4331	.4328	.4330	.1376
1.1514	.4579	.4516	.4465	.4424	.4392	.4367	.4348	.4336	.4328	.4326	.4328	.1248
1.1470	.4575	.4512	.4462	.4421	.4389	.4364	.4346	.4333	.4326	.4324	.4326	.1114
1.1425	.4571	.4509	.4459	.4418	.4386	.4362	.4344	.4331	.4324	.4322	.4324	.0975
1.1381	.4568	.4506	.4456	.4416	.4384	.4359	.4341	.4329	.4322	.4320	.4322	.0829
1.1337	.4564	.4502	.4453	.4413	.4381	.4357	.4339	.4327	.4320	.4317	.4320	.0678
1.1293	.4560	.4499	.4450	.4410	.4379	.4355	.4337	.4325	.4318	.4315	.4317	.0519
1.1250	.4557	.4496	.4447	.4407	.4376	.4352	.4335	.4323	.4316	.4313	.4315	.0353
1.1206	.4553	.4492	.4444	.4405	.4374	.4350	.4333	.4321	.4314	.4311	.4313	.0180
1.1163	.4550	.4489	.4441	.4402	.4372	.4348	.4330	.4319	.4312	.4309	.4311	.0000

LOR ARMAZENADO= 3.5998
DESEMPENHO= 22.4669
EFETIVIDADE= 96.3134
TMmed= .4393

NO INSTANTE= 43295.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
8659												
0005	.9583	.9579	.9576	.9573	.9571	.9570	.9569	.9568	.9568	.9568	.9568	.3301
0003	.9574	.9571	.9568	.9565	.9563	.9562	.9560	.9560	.9559	.9559	.9559	.3036
0000	.9566	.9562	.9559	.9557	.9555	.9553	.9552	.9551	.9551	.9551	.9551	.2748
9998	.9558	.9554	.9551	.9548	.9546	.9545	.9544	.9543	.9542	.9542	.9542	.2453
9995	.9549	.9546	.9542	.9540	.9538	.9536	.9535	.9534	.9534	.9534	.9534	.2146
9993	.9542	.9538	.9534	.9532	.9530	.9528	.9527	.9526	.9526	.9526	.9526	.1825
9990	.9533	.9528	.9525	.9523	.9520	.9519	.9518	.9517	.9516	.9516	.9516	.1491
9987	.9526	.9522	.9518	.9516	.9514	.9512	.9511	.9510	.9510	.9509	.9510	.1142
9985	.9515	.9511	.9507	.9505	.9503	.9501	.9500	.9499	.9498	.9498	.9498	.0777
9982	.9511	.9507	.9504	.9501	.9499	.9497	.9496	.9495	.9495	.9495	.9495	.0397
9979	.9500	.9496	.9492	.9489	.9487	.9485	.9484	.9483	.9483	.9483	.9483	.0000

ARMAZENADO= 46.3465
SEMPENHO= 16.5713
EFETIVIDADE= 98.8849
TMmed= .9530

APÊNDICE G

qmax= 1939.49965655360000
.02472048
.00001481
.33333335
.00126992
1.88933391
4180.70019531

.00659709
.00001481
.33333335
.00126992
1.88933391
1833.69995117

NO INSTANTE= .000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000
0000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000

;

NO INSTANTE= 5.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
1												
0000	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0201
9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0201
9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0201
9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0201
9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0201
9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0201
9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0201
9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0201
9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0201
9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0201
9966	.4005	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.4000	.0000

NO INSTANTE= 2735.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ 547	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
1.2688	.4912	.4800	.4712	.4644	.4591	.4550	.4520	.4500	.4489	.4485	.4488	.1795
1.2639	.4906	.4794	.4708	.4640	.4587	.4546	.4517	.4497	.4486	.4482	.4485	.1654
1.2590	.4900	.4789	.4703	.4636	.4583	.4543	.4514	.4494	.4482	.4479	.4482	.1506
1.2542	.4894	.4784	.4699	.4631	.4579	.4539	.4510	.4491	.4479	.4475	.4479	.1350
1.2493	.4889	.4779	.4694	.4627	.4575	.4536	.4507	.4487	.4476	.4472	.4476	.1185
1.2445	.4883	.4774	.4690	.4623	.4572	.4532	.4504	.4484	.4473	.4469	.4473	.1012
1.2398	.4877	.4769	.4685	.4619	.4568	.4529	.4500	.4481	.4470	.4466	.4470	.0830
1.2350	.4872	.4764	.4681	.4615	.4564	.4526	.4497	.4478	.4467	.4463	.4466	.0638
1.2303	.4866	.4760	.4676	.4611	.4561	.4522	.4494	.4475	.4464	.4460	.4463	.0437
1.2256	.4861	.4755	.4672	.4608	.4557	.4519	.4491	.4472	.4461	.4457	.4461	.0224
1.2209	.4855	.4750	.4668	.4604	.4554	.4516	.4488	.4469	.4458	.4454	.4458	.0000

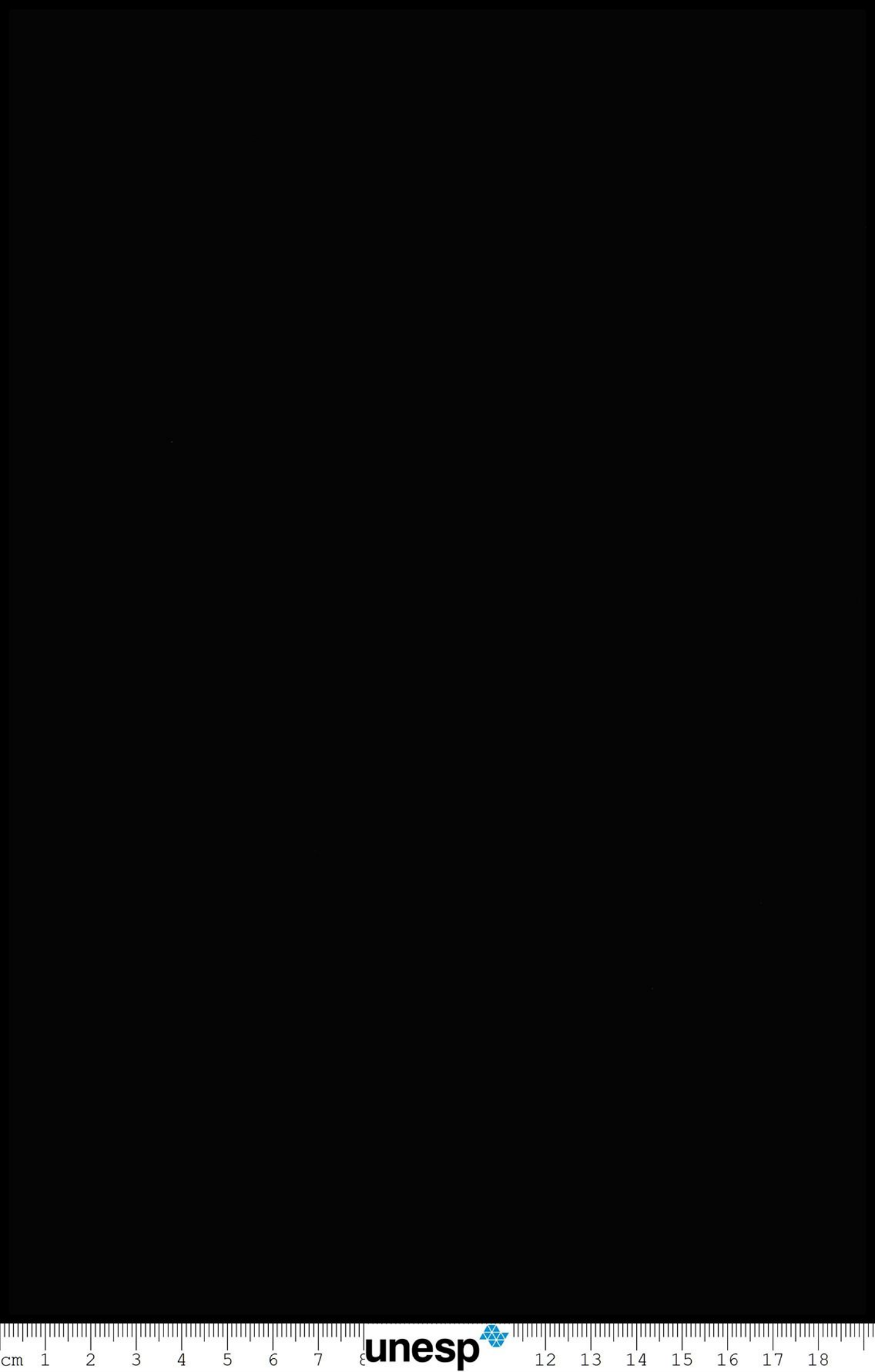
CALOR ARMAZENADO= 5.0523
DESEMPENHO= 21.7977
EFETIVIDADE= 93.8906
TMmed= .4589

NO INSTANTE= 66965.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

TFQ 13393	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TFF
1.0005	.9648	.9641	.9637	.9633	.9631	.9629	.9628	.9627	.9626	.9626	.9626	.3847
1.0003	.9640	.9635	.9631	.9627	.9625	.9623	.9622	.9621	.9620	.9620	.9620	.3545
1.0001	.9632	.9627	.9623	.9620	.9617	.9616	.9614	.9613	.9613	.9612	.9613	.3227
.9999	.9628	.9622	.9618	.9615	.9613	.9611	.9609	.9608	.9608	.9608	.9608	.2893
.9997	.9619	.9613	.9609	.9606	.9603	.9601	.9600	.9599	.9598	.9598	.9598	.2541
.9995	.9616	.9611	.9607	.9604	.9601	.9599	.9598	.9597	.9596	.9596	.9596	.2170
.9992	.9604	.9598	.9594	.9591	.9588	.9586	.9584	.9583	.9583	.9583	.9583	.1780
.9990	.9605	.9600	.9596	.9593	.9590	.9588	.9587	.9586	.9585	.9585	.9585	.1369
.9988	.9590	.9585	.9580	.9577	.9574	.9572	.9570	.9569	.9569	.9569	.9569	.0937
.9986	.9593	.9588	.9583	.9580	.9577	.9575	.9574	.9573	.9572	.9572	.9572	.0480
.9983	.9582	.9576	.9571	.9568	.9565	.9563	.9562	.9561	.9560	.9560	.9560	.0000

LOR ARMAZENADO= 46.8088
DESEMPENHO= 15.1183
EFETIVIDADE= 98.8708
TMmed= .9599


cm 1 2 3 4 5 6 7 8
unesp
12 13 14 15 16 17 18