

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM REFRIGERADOR SOLAR
POR ADSORÇÃO FÍSICA

12/93

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM REFRIGERADOR SOLAR
POR ADSORÇÃO FÍSICA

GERSON BARBOSA 2/034

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ ANTONIO DERMENGI RIOS†


Parecer

Este exemplar corresponde
a versão final da tese
defendida por Gerson
Barbosa e aprovada
pela Comissão Julga-
dora em 12.04.93


Tese apresentada à Faculdade
de Engenharia de Alimentos da
Universidade Estadual de Campinas
para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia de Alimentos.




BANCA EXAMINADORA



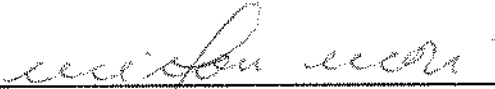
Prof. Dr. José Antonio Dermengi Rios
(Orientador)



Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto
(Membro)



Prof. Dr. Theo G. Kieckbusch
(Membro)



Prof. Dr. Milton Mori
(Membro)

Campinas, 04 de abril 1993

AGRADECIMENTOS:

Prof. Dr. José Antonio Dermengi Rios, pela orientação e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Prof. Vivaldo Silveira Júnior, pelo fornecimento de dados do ciclo real, pelas explicações acerca do comportamento e operação do protótipo, e discussões sobre a interpretação dos resultados.

Sr. João Batista de Moura e Sr. Júlio Cesar Vuolo Soares, da Duratex S.A., pela liberação de tempo e equipamento para a execução do presente trabalho.

Sr. Francesco Anibale Carnevale, da Elanco Química Ltda, pela liberação de tempo para a conclusão do presente trabalho.

Associação Brasileira das Indústrias de Alimentos, pelo fornecimento das cópias deste trabalho.

Í N D I C E

TABELAS	i
FIGURAS	ii
NOMENCLATURA	iii
RESUMO	iv
SUMMARY	vii
 I - INTRODUÇÃO	 1
 II - REVISÃO DA LITERATURA	
II.1. - DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA.....	3
II.2. - ADSORÇÃO	4
II.2.1. - Adsorção em Microporos	5
II.2.2. - Funcionamento do Ciclo	8
II.3. - ENERGIA SOLAR	10
II.4. - BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA	11
II.4.1. - Mecanismo Determinante da Taxa de Sorção.....	11
II.4.2. - Balanços de Massa e Energia em Regime Transiente	13
 III - MATERIAIS E MÉTODOS	
III.1. - MATERIAIS	17
III.1.1. - Características Construtivas	17
III.1.2. - Equações Utilizadas	19
III.2. - MÉTODOS	24
III.2.1. - HIPÓTESES E SIMPLIFICAÇÕES	24
III.2.2. - RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES	28
III.2.2.1. - Métodos Numéricos Utilizados	28
III.2.2.2. - Descrição do Programa	30

IV - RESULTADOS E ANÁLISES

IV.1. - VALIDAÇÃO DO MODELO	33
IV.1.1. - Comportamento da Pressão do Leito Adsorativo	42
IV.1.2. - Comportamento da Temperatura do Leito Adsorativo	43
IV.1.3. - Diagrama de Estado	45
IV.2. - ESTUDO DA SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA DO MODELO .	46
IV.3. - UTILIZAÇÃO DO MODELO NA ESTIMATIVA DE POSSIBILIDADES DE GANHO NO DESEMPENHO DO REFRIGERADOR SOLAR	49
IV.3.1. - Utilização de outros tipos de carvão	49
IV.3.2. - Aumento da massa de carvão ativo DEION	50
IV.4. - OBSERVAÇÕES SOBRE OUTROS PARÂMETROS DO MODELO .	51
IV.4.1. - Gradiente radial de temperatura no leito	51
IV.4.2. - Taxa de dessorção de metanol	52
IV.5. - ANÁLISE DE ALGUMAS VARIAÇÕES DO MODELO PROPOSTO	53
IV.5.1. - Modelagem do leito por parâmetros concentrados	53
IV.5.2. - Modelagem do leito por parâmetros distribuídos incluindo o gradiente angular	54

V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

V.1. - CONCLUSÕES	59
V.2. - SUGESTÕES	60

VI - BIBLIOGRAFIA

VII - ANEXOS

VII.1. - fluxograma do programa	67
VII.2. - Lista de variáveis do programa	68
VII.3. - Listagem do programa	75

ÍNDICE DE TABELAS

III.1. - Dados dos elementos do refrigerador.	18
IV.1. - Valores utilizados nas simulações.	41
IV.2. - Comparação simulação vs. ciclo real 52.	41
IV.3. - Parâmetros estudados quanto à sensibilidade.	47
IV.4. - Efeito da troca de calor para o ambiente por convecção.	47
IV.5. - Efeito da emissividade da cobertura para o ambiente.	48
IV.6. - Efeito da condutividade térmica do leito.	48
IV.7. - Desempenho simulado de diferentes carvões.	49
IV.8. - Tempos de execução de um ciclo completo para os modelos estudados.	57

ÍNDICE DE FIGURAS

II.1. - Esquema da disposição dos componentes do refrigerador solar.	3
II.2. - Esquema do funcionamento do sistema.	8
II.3. - Diagrama de estado para ciclo teórico do par carvão ativo AC-35 / metanol.	9
III.1.- Representação do coletor como composto por dois sistemas em série: cobertura e leito.	21
IV.1. - Resposta do coletor a variação em degrau da radiação incidente, e comparação com a resposta de um sistema de 1ª ordem com tempo característico de 21 minutos.	34
IV.2. - Erro de convergência com DTAU decrescente para a resposta ao estímulo em degrau apresentado na figura IV.1.	35
IV.3. - Pressão do leito adsortivo. Ciclo real comparado com ciclo simulado.	42
IV.4. - Temperatura do leito adsortivo. Ciclo real comparado com ciclo simulado.	44
IV.5. - Temperatura do leito adsortivo. Diferença entre ciclo real e ciclo simulado.	44
IV.6. - Diagrama de estado do ciclo 52.	45
IV.7. - Diagrama de estado do ciclo simulado.	46
IV.8. - Massa ciclada de metanol em função da massa de carvão DEION.	50

IV.9. - Variação radial de temperatura em função da condutividade térmica do leito adsorativo.	51
IV.10.- Evolução da massa dessorvida para o ciclo real e simulação.	52
IV.11.- Comparação da evolução da temperatura do coletor entre o modelo simplificado (parâmetros concentrados) e o modelo adotado (parâmetros distribuídos com gradiente radial).	54
IV.12.- Evolução dos gradientes radial e angular para o modelo por parâmetros distribuídos com duas dimensões.	56

NOMENCLATURA

A	[m ²]	área de um corpo.
a		atividade do vapor.
ab		absortância.
B		constante = $k.R^2$.
c	[J/kg.K]	calor específico de um corpo.
D		constante = B / β^2 .
Dc	[m ² /s]	difusividade mássica intracristalina.
EL	[kJ/kg]	calor latente do adsorvato.
EV		emissividade da cobertura para o ambiente externo.
EIN		emissividade da cobertura para o leito.
f		fator de forma.
Go	[W/m ²]	energia solar incidente sobre superfície horizontal.
Gsc	[W/m ²]	constante solar.
h, hc	[W/m K]	coeficiente de troca térmica por convecção.
hr	[W/m ² K]	coeficiente de troca térmica por radiação.
HCEX	[W/m ² K]	coeficiente de troca térmica por convecção entre cobertura e ambiente externo.
HCIN	[W/m ² K]	coeficiente de troca térmica por convecção entre cobertura e leito.
ke		constante.
k	[W/m K]	condutividade térmica.
KR	[W/m K]	condutividade térmica do leito adsorativo.
L	[m]	comprimento característico.
ma	[g/g]	massa adsorvida específica por massa de adsorvente anidro.
m	[kg]	massa de um corpo.
n		constante da equação Dubinin - Astakov.
p	[mbar]	pressão absoluta.
ps	[mbar]	pressão de vapor saturante.
q	[W]	taxa de calor.
q(r,t)	[kg/m ³]	concentração da fase adsorvida.

QSOL	[W/m ²]	energia solar instantânea recebida pelo coletor.
R	[8,314 J/kgmol K]	constante dos gases perfeitos.
r	[m]	raio.
S		sensibilidade.
S _R		sensibilidade relativa.
t	[min]	tempo.
T	[K]	temperatura absoluta.
T _{amb}	[K]	temperatura ambiente.
T _c	[K]	temperatura de um corpo.
T _{ceu}	[K]	temperatura do céu.
U	[W/m ² K]	coeficiente global de troca térmica.
V [*]	[ml/mol]	volume molar de substância adsorvida.
W	[cm ³ /g]	volume dos microporos preenchidos.
w	[°]	ângulo horário.
W _o	[cm ³ /g]	volume máximo adsorvível.

Símbolos gregos

α	[m ² /h]	difusividade térmica.
α_1		coeficiente de expansão.
β_a		coeficiente de afinidade.
β	[°]	azimute (ângulo).
δ		função do período do ano.
Δi		variação da propriedade i.
ϵ	[J/mol]	trabalho molar diferencial de adsorção.
ϕ	[°]	latitude geográfica.
∇		operador gradiente.
∇^2		operador Laplaciano.
ρ	[kg/m ³]	densidade do líquido.
σ	[2,04 x 10 ⁻⁷ kJ/h.m ² .K ⁴]	constante de Stefan - Boltzmann.
θ		fração volumétrica adsorvida em microporos.
θ_z	[°]	ângulo de incidência de energia solar.
τ	[h]	tempo característico.

RESUMO

Descreve-se a elaboração de um modelo matemático simplificado e sua validação através da simulação em regime transiente de um ciclo real, realizado com um refrigerador solar por adsorção física utilizando um par carvão ativo / metanol.

A diferença em relação aos resultados obtidos no ciclo real foi 4% para a massa ciclada de metanol, 2,2% para a temperatura máxima do coletor, e 3×10^{-3} para o Coeficiente de Performance Teórico do Ciclo - C.O.P.T.C.

Simulações adicionais do mesmo ciclo mostraram a possibilidade de se aumentar a massa de metanol ciclada em cerca de 150%, utilizando-se de parâmetros da equação Dubinin - Astakov correspondentes a diferentes tipos e quantidades maiores de carvão ativo.

SUMMARY

This study describes the construction of a simple mathematical model and its validation through the simulation in transient state of a real cycle performed by a solar refrigerator based on physical adsorption using an activated carbon / methanol pair.

The deviation from experimental results was 4% for the cycled mass of methanol, 2.2 % for maximum collector average temperature, and 3×10^{-3} for the theoretical cycle coefficient of performance.

Additional simulations of the same cycle inputting values representing different types and larger amounts of activated carbon showed the possibility of increasing the cycled methanol mass up to about 150 %.

I - INTRODUÇÃO

Apresenta-se um modelo matemático que representa o desempenho de um refrigerador solar por adsorção física de conceito construtivo similar ao do protótipo estudado por SILVEIRA Jr. (1990). Este modelo permite a análise da influência de fatores como propriedades do carvão ativo e coeficientes de troca de calor sobre o Coeficiente de Performance (C.O.P.) do refrigerador, que representa seu desempenho ao longo de um ciclo diário.

Contribui assim no projeto de novos protótipos visando obter ganhos de desempenho com baixo custo. O modelo é o mais simples possível, contemplando a necessidade de funcionalidade, e de rapidez de utilização, levando no entanto em conta os fenômenos básicos que descrevem a evolução das variáveis principais.

A utilização de modelos matemáticos no estudo do comportamento de um sistema pode permitir um ganho apreciável no conhecimento deste sistema, com economia de recursos financeiros, tempo e mão-de-obra. Este ganho depende principalmente de fatores como a complexidade do sistema e do modelo construído, além de:

- conhecimento teórico sobre o sistema;
- técnicas disponíveis para a construção do modelo;
- tempo disponível para a elaboração e execução da modelagem;
- dados experimentais disponíveis sobre este sistema ou similares.

O refrigerador solar por adsorção física é um sistema cujo comportamento pode ser descrito fisicamente como englobando um processo adsorptivo cíclico condicionado por trocas de massa e energia em regime transiente.

A teoria que descreve os balanços de massa e energia e a adsorção em microporos por preenchimento de volume inclui leis empíricas, como a 2ª lei de Fourier e a lei de Newton para o resfriamento, e equações semi empíricas, como a de Dubinin-Astakov, que descreve o equilíbrio massa adsorvida-vapor do par adsorvato/adsorvente (no caso, metanol/carvão ativo).

Utilizando-se destas ferramentas e dos dados de SILVEIRA Jr. (1990), foi construído um modelo matemático que permite avaliar a influência dos seguintes fatores sobre o desempenho do refrigerador solar: dimensões dos tubos, valor dos coeficientes de troca de calor por condução, convecção e radiação, e uso de diferentes tipos de carvão caracterizados pelos seus parâmetros da equação Dubinin-Astakov.

Segundo LUYBEN (1974), um modelo deve ser tão simples quanto possível, retendo as características essenciais do sistema modelado, e as hipóteses propostas devem ser consideradas e listadas.

FINGER & NAYLOR (1967) propõem que a validação de um modelo seja feita em três fases:

- validação da lógica;
- validação das hipóteses propostas no modelo;
- validação do comportamento do modelo.

Estes aspectos são abordados nos capítulos III e IV.

Como linguagem de programação utilizou-se o Pascal, e como equipamento um computador PC AT com processador 80286 de 16 MHz, sem coprocessador matemático. Neste equipamento, o tempo típico de duração da simulação de um ciclo completo é 35 minutos.

II - REVISÃO DA LITERATURA

II.1. - DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

O refrigerador solar é composto pelos elementos mostrados na figura II.1.

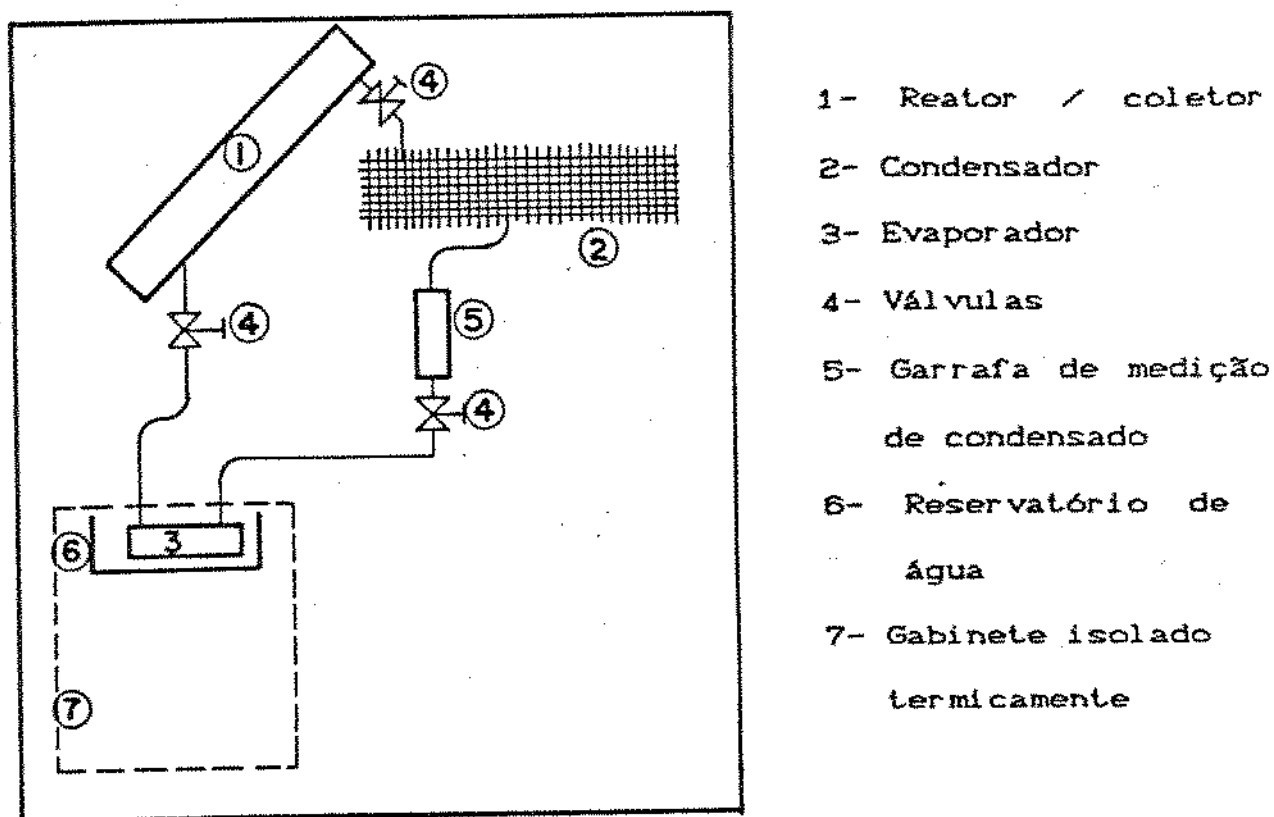


Fig.II.1. Esquema da disposição dos componentes do refrigerador solar.

Seu funcionamento foi descrito detalhadamente por SILVEIRA Jr. (1990). No presente trabalho apresenta-se uma descrição resumida da forma de operação do sistema, no item II - 2.2.

II.2. - ADSORÇÃO

A adsorção é um fenômeno definido como sendo a capacidade de uma substância a se ligar sobre uma superfície. A adsorção ocorre porque as moléculas que compõe a interface de uma substância possuem as forças de atração desbalanceadas na direção perpendicular ao plano desta interface (CIOLA, 1981). Uma substância fluida ao encontrar-se próxima à superfície de outra fluida ou sólida tenderá a ser repelida ou atraída para um ponto mais próximo à superfície.

A adsorção pode ser física ou química. No presente trabalho interessa a adsorção física, que tem como características típicas:

- calor de adsorção até cerca de 3 vezes maior que o calor de vaporização.
- a adsorção ocorre em mono ou multicamada, ou em microvolumes.
- não há dissociação da espécie adsorvida.
- é rápida, reversível e não ativada.

As forças envolvidas na adsorção incluem tanto forças de Van der Waals (dispersão-repulsão) que contribuem para o calor de adsorção com cerca de 1 kcal/mol, e interações eletrostáticas, que contribuem somente quando existem interações iônicas na adsorção. Para o caso de moléculas dipolares pequenas como o metanol, a sua contribuição pode chegar a 25-30 kcal/mol (RUTHVEN, 1984).

II.2.1. - Adsorção em Microporos

Segundo DUBININ (1967), as equações de B.E.T. e Langmuir descrevem adequadamente a adsorção em adsorventes contendo macroporos (>100 nm), mesoporos (4 a 100 nm) ou sem poros, mas não podem ser aplicadas na descrição da adsorção em microporos, como é o caso do carvão ativo utilizado no presente trabalho.

Para adsorventes com microporos (menores que 4 nm) não se formam camadas sobrepostas, mas acontece o preenchimento do volume do espaço para adsorção.

DUBININ (1967) desenvolveu a teoria de equilíbrio de adsorção de gases e vapores baseado no preenchimento do volume máximo W_0 , expressando o volume dos microporos por massa unitária de adsorvente. Nesta teoria, duas funções são associadas aos parâmetros de equilíbrio da adsorção; a primeira função representa a diminuição da energia livre na adsorção:

$$\epsilon = R.T \ln (p_s/p), \quad \text{Eq. (II.1)}$$

onde:

R = constante dos gases perfeitos

T = temperatura em K

p = pressão absoluta

p_s = pressão de vapor saturante.

esta equação considera o volume líquido ao estado padrão, a temperatura T e em equilíbrio com seu vapor saturado à pressão p_s . " ϵ " é o trabalho molar diferencial de adsorção.

A segunda função é o volume preenchido do espaço da adsorção W:

$$W = a \cdot V^*, \quad \text{Eq. (II.2)}$$

onde V^* = Volume molar da substância adsorvida.

Desta forma, segundo resultados experimentais de sistemas carvão ativo com diversos adsorvatos, DUBININ (1947) sugeriu, conforme substantiado teoricamente por RADUSHKEVICH (1949) a seguinte equação para expressar a distribuição dos volumes preenchidos do espaço de microporo adsorvido W:

$$W = W_0 \cdot \exp \left(k_b \cdot \frac{\varepsilon^2}{\beta_a} \right), \quad \text{Eq. (II.3)}$$

ou na forma denominada equação de Dubinin - Radushkevich (D-R) para isoterma:

$$a = \frac{W_0}{V^*} \cdot \exp \left(B \cdot \frac{T^2}{\beta_a^2} \left[\ln(p_s/p)^2 \right]^2 \right), \quad \text{Eq. (II.4)}$$

onde:

a = atividade do vapor.

$B = k_b \cdot R^2$ é diretamente proporcional ao parâmetro da função de distribuição k_b , e β_a é o coeficiente de afinidade.

GRENIER et alii (1983) e PASSOS et alii (1986) escrevem esta equação considerando as seguintes simplificações:

$$\theta = \frac{W}{W_0} \quad \text{e} \quad D = \frac{B}{\beta_a^2} = k_a \cdot \frac{R_1^2}{\beta_a}.$$

BERING et alii (1966) expressam o calor diferencial de adsorção molar como:

$$H_s = E_L + \frac{2,3 \cdot \beta_a \cdot R_1}{B^{1/2}} \cdot \left[\left(\ln \frac{W_0}{a \cdot V} \right)^{1/2} + \frac{\alpha_1 \cdot T}{2} \cdot \left(\ln \frac{W_0}{a \cdot V} \right)^{-1/2} \right], \quad \text{Eq. (II.5)}$$

onde:

α_1 = coeficiente de expansão

E_L = calor latente.

Outros modelos empíricos para o estado de equilíbrio de adsorventes foram apresentados por HUBER et alii (1978), semelhante à equação D-R, e por RIOS (1984) semelhante à equação de Clausius-Clapeyron.

RAND (1976) recomenda, para amplas faixas de pressão, o uso da equação de Dubinin-Astakov, semi empírica e expressa na forma:

$$W = W_0 \cdot \exp \left[-k_b \cdot \epsilon^n \right] , \quad \text{Eq. (II.6)}$$

pois o parâmetro "n" permite ajustes que minimizam os desvios apresentados pela equação D-R para adsorventes com raio dos microporos menores ou maiores, ocorrendo n maior ou menor que 2, respectivamente.

Pela equação de Dubinin-Astakov pode-se obter graficamente curvas de equilíbrio para isóbaras e isotermas, com os parâmetros do par carvão ativado/metanol.

Utilizando os valores do carvão DEION (SILVEIRA Jr., 1990):

$$W_0 = 0,2662 \text{ cm}^3/\text{g}$$

$$D = 9,69835 \times 10^{-7}$$

$$n = 2$$

tem-se para as isotermas:

$$m = 0,2662 \times \rho(T) \cdot \exp \left[-9,69835 \times 10^{-7} \cdot \left(T \cdot \ln(p_s^{(T)} / p) \right)^2 \right] ,$$

$$\text{Eq. (II.7)}$$

onde:

$p / p_s(T)$ = pressão relativa, igual ao coeficiente de atividade "a";

m = massa adsorvida por massa de adsorvente anidro;

$\rho(T)$ e $p_s(T)$ variam em função da temperatura do leito.

II.2.2. - Funcionamento do Ciclo

Na figura II.2. tem-se esquematizadas as formas de atuação dos trocadores de calor.

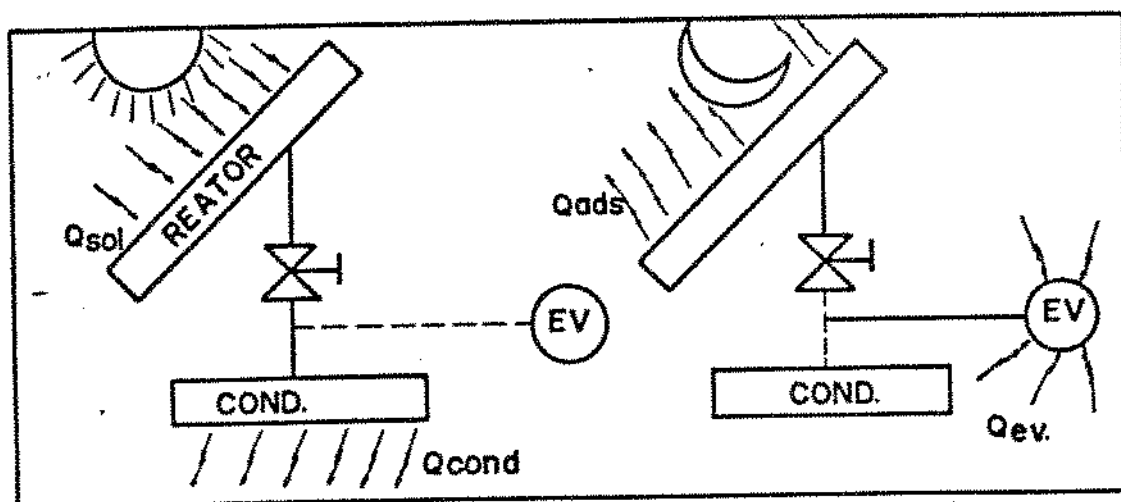


Fig. II.2. Esquema do funcionamento do sistema, onde:

Q_{sol} = energia recebida do sol durante o aquecimento do reator, e dessorção do metanol.

Q_{ads} = energia liberada pelo metanol quando adsorvido no reator na fase final do ciclo, devido à queda da pressão no reator.

Q_{ev} = energia tomada pelo metanol quando este evapora, e é posteriormente adsorvido no reator.

Q_{cond} = energia cedida pelo metanol para o ambiente, quando ele condensa após dessorção.

Com a equação (II.7), mais a equação da pressão de saturação do metanol, traça-se o ciclo completo, conforme se vê na fig. II.3.

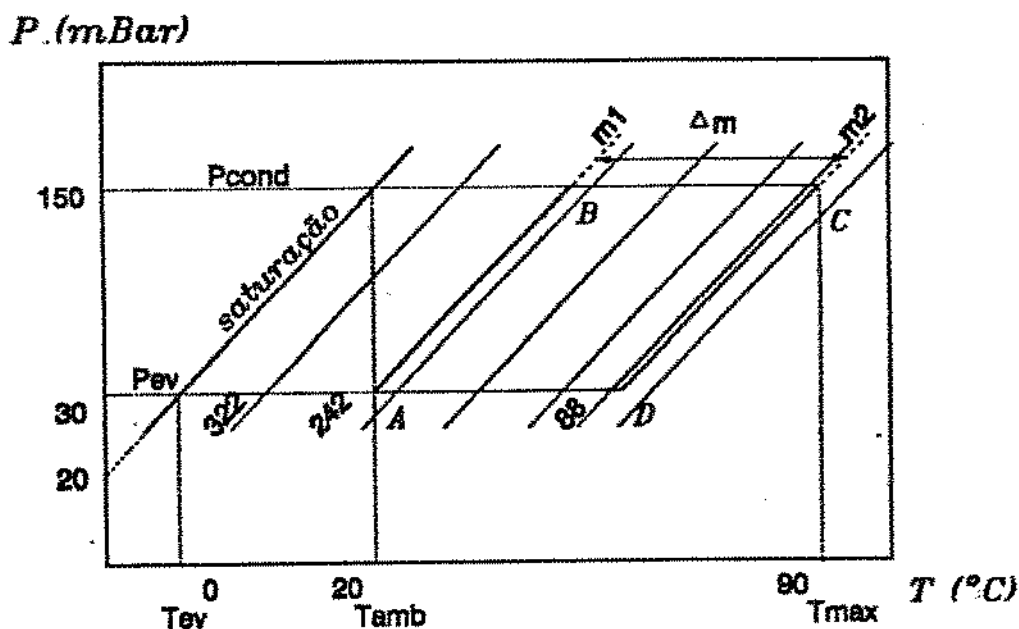


Fig. II.3. Diagrama de estado para ciclo teórico do par c. a. AC-35 / metanol.

Nesta figura, o segmento A-B representa a fase inicial de aquecimento com o coletor fechado, e tem-se pressão e temperatura do coletor aumentando com massa adsorvida constante.

No segmento B-C a pressão do coletor já atingiu a pressão de saturação, que prevalece no condensador. No ponto B, liga-se o coletor ao condensador e dá-se a dessorção até que se consiga a máxima temperatura do ciclo, no ponto C.

Para iniciar o segmento C-D, fecha-se novamente o coletor, que resfria com massa constante até atingir uma pressão igual à do evaporador, no ponto D.

A partir deste ponto conecta-se coletor e evaporador, ocorrendo a adsorção no coletor, e que causa a evaporação no evaporador e consequente efeito frigorífico (segmento D-A).

II.3. - ENERGIA SOLAR

Segundo DUFFIE e BECKMAN (1974), a energia solar que incide sobre uma superfície horizontal, pode ser calculada por:

$$G_o = G_{sc} \cdot [1 + 0,003 \cdot \cos (360 \cdot n / 365) \cdot \cos \theta_z], \text{ Eq. (II.8)}$$

onde:

G_{sc} = constante solar, igual a aproximadamente 1353 W/m^2

n = dia do ano

θ_z = ângulo de incidência da radiação solar.

Quando se passa a considerar a influência da atmosfera sobre esta radiação, seu valor é consideravelmente reduzido. O ângulo de incidência θ_z , quando aplicado a uma superfície inclinada, é chamado θ , definido por:

$$\cos \theta = \cos (\phi + \beta) \cos \delta \cos w + \sin (\phi + \beta) \sin \delta, \text{ Eq. (II.9)}$$

sendo:

θ = ângulo de inclinação da linha normal ao plano do coletor em relação ao Sol, composto pelos ângulos:

ϕ = latitude geográfica = $- 23^\circ \text{ C}$ (sul) para a cidade de Campinas

β = azimuth, correspondente à inclinação do coletor em relação à horizontal = zero, pois sua inclinação coincide com a do piranômetro pelo qual se mediu a quantidade de energia recebida por radiação durante o ciclo experimental.

δ = função do período do ano em que se realiza o ciclo, igual a:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[360 \cdot \left(\frac{284 + m}{365} \right) \right],$$

com m = dia do ano, que é 52 para o dia 25.02.88, cujo ciclo é utilizado para comparação com o modelo.

w = ângulo horário, sendo 15° correspondentes a uma hora, com valor zero ao meio dia, negativo pela manhã e positivo à tarde.

O tempo é tomado com referência ao Sol (tempo solar), e está dois minutos atrasado com relação ao 'tempo padrão' do fuso horário vigente no local e data do ciclo em questão. Para o horário padrão em minutos:

$$w = \cos [2\pi(TP - 362)/1440]$$

Temos então, para a energia solar recebida instantaneamente pelo coletor:

$QSOL = Gsc \cdot \cos(\phi + \beta) \cos \delta \cos w + \sin(\phi + \beta) \sin \delta$
Evidenciando $\cos w$ e resolvendo para ϕ , β e δ , que são conhecidos, temos:

$$QSOL = Gsc * 0,903 * \cos w + 0,0761$$

que, em função do tempo em minutos, TP dá:

$$QSOL = Gsc \cdot 0,903 \times \cos [2\pi (TP - 362) / 1440] + 0,0761,$$

Eq.(II.10)

onde $Gsc = 1122 \text{ W/m}^2$ é o máximo valor registrado experimentalmente no ciclo 52.

Esta equação pode ser utilizada para representar a radiação solar recebida pelo coletor multitubular.

II.4. - BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA

II.4.1. - Mecanismo Determinante da Taxa de Sorção

RUTHVEN (1984) apresenta uma abrangente exposição sobre a cinética de sorção em sistemas do tipo batelada. Sua análise conclui que a taxa de sorção física em uma superfície geralmente é tão rápida que a taxa global do processo é determinada pela resistência à transferência de massa ou calor, ao invés de ser controlada pela cinética intrínseca da sorção.

Ele apresenta situações, onde se considera, por exemplo:

- sorção isotérmica com controle pela transferência de massa a nível de microporos: aqui, a transferência de massa no interior da partícula é o passo limitante, e o gradiente de temperatura no interior da partícula é desprezível, assim como os fenômenos externos à partícula.

Aproximando a forma da partícula para uma esfera, a equação é típica de um processo de difusão, e tem-se:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r^2 \cdot D_c \cdot \frac{\partial q}{\partial r} \right) , \quad \text{Eq. (II.11)}$$

onde:

D_c = difusividade mássica intracristalina, em m^2/s

$q (r, t)$ = concentração da fase adsorvida, em kg / m^3 .

- sorção não-isotérmica com controle de difusão nos microporos: neste caso, além da equação (II.11), deve-se considerar também o equilíbrio da fase adsorvida na superfície do adsorvente e a dependência da difusividade em relação à temperatura, aumentando a complexidade da descrição do fenômeno.

SUN e MEUNIER (1987) analisaram por simulação a sorção controlada a nível dos microporos para o caso zeolita/água, impondo uma variação em degrau na pressão do meio da ordem de 20 mb, para partículas esféricas com raio de 1 mm. Eles encontraram tempos da ordem de cinco a trinta minutos para que fosse atingido o novo equilíbrio após o degrau, sendo que esta faixa de tempos de resposta se deve aos diferentes valores adotados para parâmetros do sistema, como os números de Biot (relação entre resistência interna e externa) e de Lewis (relação entre difusividade térmica e mássica).

Estes trabalhos, assim como também demonstrado experimentalmente por KARAGIORGIAS e MEUNIER (1986), permitem dizer que a transferência de calor no interior dos microporos não é limitante. RUTHVEN (1984), fundamenta esta afirmação com o fato geral de que a área externa de contato de uma partícula é muito maior do que a área externa de contato de um conjunto de partículas.

Em um processo típico de ciclo adsorptivo por energia solar as taxas de sorção envolvidas são pequenas o suficiente para se considerar que as transferências de calor e massa a nível dos microporos não são limitantes.

Face a estes resultados admite-se, no presente trabalho, que a transferência de calor no leito adsorptivo (região externa aos microporos) é o mecanismo controlador da velocidade do processo. Esta hipótese, também considerada por GUILLEMINOT e MEUNIER (1987), implica em tomar o leito adsorptivo com sendo um meio homogêneo, e também em assumir que a difusão do adsorvato é suficientemente rápida para não influenciar a taxa de sorção. Isto equivale a admitir que a pressão é uniforme em todo o leito adsorptivo.

II.4.2. - Balanços de Massa e Energia em Regime Transiente

Na modelagem de um sistema em regime transiente deve-se optar por levar ou não em conta gradientes internos aos elementos (reatores, vasos, corpos sólidos em geral) que compõem este sistema. Desprezando-se estas variações, o modelo é denominado de modelo de parâmetros concentrados.

Caso se inclua as variações em função de posição ocorridas no interior dos elementos, o modelo em questão é chamado modelo de parâmetros distribuídos.

Sistemas de Parâmetros Concentrados

Uma consideração central na elaboração de um modelo para a representação de um fenômeno transiente é que se leve em conta a inércia térmica dos componentes.

Um exemplo clássico é dado por KREITH (1973). Considere-se uma barra metálica ou outro corpo sólido similar com relação volume/área = L cuja condutividade térmica (k) seja alta em relação ao coeficiente médio de troca térmica na interface entre o corpo e o meio ambiente (\bar{h}), relação esta que se expressa pelo

número de Biot ($\bar{h}.L/k$).

Se o número de Biot for menor que 0,1, pode-se desprezar o gradiente de temperatura no interior do corpo. Assim, mudando-se instantaneamente a temperatura do meio ao redor do sólido, este muda sua temperatura proporcionalmente à força termodinâmica, ou seja, a diferença de temperatura entre o corpo e o meio, de forma a atingir um novo estado de equilíbrio.

Pode-se expressar este fenômeno pela equação:

$$(m \cdot c)_{\text{corpo}} \cdot \frac{\partial T_{\text{corpo}}}{\partial t} = h \cdot A \cdot (T_{\text{corpo}} - T_{\text{ambiente}}),$$

Eq. (II.12)

onde:

A = área de troca térmica do corpo.

O tempo necessário para que o corpo atinja 98% da variação total de sua temperatura (desde a condição inicial até a final) é o equivalente a 4 vezes o tempo característico do sistema constituído pelo corpo e o meio que o cerca, e se expressa por:

$$\tau = \frac{(m \cdot c)_{\text{corpo}}}{\bar{h} \cdot A}, \quad \text{Eq. (II.13)}$$

Sistemas de Parâmetros Distribuídos

Ainda considerando o exemplo acima, caso a condutividade térmica seja relativamente baixa, a resistência ao fluxo de energia no interior do corpo passa a limitar sua taxa de aquecimento ou resfriamento, e deve-se considerar tanto a resistência interna quanto a externa ao fluxo de calor.

Partindo da equação de energia para sólidos, segundo BIRD et alii (1960), tem-se:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = - (\nabla \cdot \vec{q}), \quad \text{Eq. (II.14)}$$

onde:

ρ = massa específica, em kg / m³

c = calor específico, em W / kg °C,

sendo $\vec{q} = -k \nabla T$, o fluxo de calor por condução,

e ∇T o gradiente de temperatura no corpo sólido.

Se k for constante, a equação (II.13) pode ser escrita:

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T, \quad \text{Eq. (II.15)}$$

onde:

$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c}$ = difusividade térmica, em m²/h

k = condutividade térmica, em w / h m °C

$\nabla^2 T$ é o Laplaciano da temperatura.

Para um cilindro maciço de comprimento infinito e com propriedades físicas constantes, a variação de temperatura em função do tempo e posições radial e angular pode ser expressa por:

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}, \quad \text{Eq. (II.16)}$$

onde:

r = raio do cilindro.

Além desta descrição, é necessário o balanço nas fronteiras do sólido.

No caso de um espaço anular com raio interno r_0 e raio externo r_1 , pode-se definir as condições de contorno em função das trocas de calor e massa que ocorrem nestas interfaces.

Considere-se, por exemplo, que o espaço anular do cilindro em questão está isolado na fronteira interna; o balanço ficará:

$$\text{em } r = r_0: \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad \text{Eq. (II.17)}$$

Suponha-se ainda que na fronteira externa o sólido troque calor com o ambiente por convecção; ter-se-á:

$$\text{em } r = r_1: \quad -k \frac{\partial T}{\partial t} = h \cdot (T - T_{\text{amb}}), \quad \text{Eq. (II.17a)}$$

Considere-se agora que este cilindro receba energia sob a forma de radiação de uma fonte que esteja distante e posicionada diretamente acima do cilindro, de forma que sua direção de incidência seja sempre constante em relação a θ . Por motivo da simetria angular do cilindro define-se como segue as condições de contorno para a variável θ :

a insolação é máxima no topo ($\theta = 0$) e nula a partir de $\theta = \pi/2$.

Ter-se-á então:

$$\text{em } \theta = 0 \text{ ou } \pi: \quad \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0, \quad \text{Eq. (II.18)}$$

III - MATERIAIS E MÉTODOS

III.1. - MATERIAIS

III.1.1. - Características Construtivas

Apresenta-se algumas características básicas do protótipo utilizado por SILVEIRA Jr. (1990), e do qual foram extraídos dados aplicados no presente trabalho para a validação do comportamento do modelo simplificado.

O coletor solar é constituído por duas partes:

- O reator, com uma área de captação total de $1,08\text{m}^2$, composta por vinte tubos de cobre cada um com 1000 mm de comprimento e 52 mm de diâmetro interno, arranjados em paralelo. Concentricamente no interior de cada tubo, foi colocado um tubo de tela metálica com diâmetro de 22 mm, formando um espaço anular de 16 mm de raio, que foi preenchido com carvão ativado.

Nas extremidades destes 20 tubos, foram colocados tubos distribuidores com diâmetro interno de 77 mm.

- A caixa de suporte foi construída em cedro naval de 10 mm de espessura, com as seguintes dimensões: 1450 mm de largura, 1350 mm de comprimento, e 170 mm de altura. Sua função é dar sustentação ao coletor e isolá-lo termicamente.

O vidro que cobre a caixa tem 4 mm de espessura, é praticamente transparente à radiação solar na faixa de comprimento de onda entre 0,2 e 2,6 μm e possui baixa transmitância às irradiações de superfície negra, propiciando a ocorrência do chamado "efeito estufa".

O condensador e o evaporador são recipientes cujas características básicas estão relacionadas abaixo, e cujos detalhes construtivos foram expostos por SILVEIRA Jr. (1990).

Tab. III.1. Dados dos elementos do refrigerador.

<u>coletor:</u>		
área = 1,08 m ²		
material	massa (kg)	calor específico (kJ/kg °C)
cobre	30,2	0,385
vidro	10,8	0,837
carvão	9,9	0,921
metanol	1,75	2,469
<u>gabinete:</u>		
área = 4,0 m ²		
massa = 1,0 kg (água)		
calor específico = 4,18 kJ/kg °C		
<u>evaporador:</u>		
área = 0,01 m ²		
massa = 2,0 kg (metanol)		
calor específico = 2,47 kJ/kg °C		
<u>condensador:</u>		
área = 22,0 m ²		
massa = 20,0 kg (cobre) + 2,0 kg (metanol)		
calor específico = 0,39 kJ/kg °C.		

Note-se que a massa de metanol, que varia ao longo do ciclo, está expressa como valor representativo, mas assume valores diferentes para cada caso modelado.

Quanto ao evaporador, condensador e gabinete, a informação essencial é sua inércia térmica, que somente será igual à respectiva capacidade térmica se todo o conteúdo de cada recipiente estiver à mesma temperatura, o que somente se pode assumir no presente trabalho como hipótese simplificativa.

III.1.2. - Equações Utilizadas

Além das equações (II.7, 12 e 16), utilizou-se:

- Equação de Antoine para cálculo da pressão de vapor do metanol puro:

$$P_s = \exp [18,5875 - 3626.55/(T-34,29)], \quad \text{Eq. (III.1)}$$

onde:

P_s = pressão de vapor do metanol à temperatura T , em mmHg,

T = temperatura absoluta do metanol, em K.

- Equação de troca de calor por radiação:

$$q = U_r \cdot A \cdot (T_a - T_b), \quad \text{Eq. (III.2)}$$

sendo:

$$U_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_a + 273,15)^4 - (T_b + 273,15)^4] / (T_a - T_b),$$

com:

Eq. (III.3)

ε = emissividade térmica,

σ = constante de Stefan - Boltzmann =

$$2,04 \times 10^{-7}, \text{ em kJ/h m}^2 \text{ K}^4.$$

Se a troca for com o ambiente, utiliza-se a temperatura do céu, conforme DUFFIE e BECKMAN (1980):

$$T_{ceu} = 0,0552 \cdot (T_{amb})^{1.5}, \quad \text{Eq. (III.4)}$$

com T_{amb} em K.

Condensador e Evaporador

No condensador e no evaporador, aplica-se o conceito de parâmetros concentrados, conforme a equação (II.12), incluindo-se ao lado direito um termo devido ao calor latente de evaporação ou condensação de metanol e, no caso do condensador, um termo representativo da incidência de energia solar.

Tem-se então, para o condensador:

$$(m \cdot c)_c \cdot \frac{\partial T_c}{\partial t} = -U \cdot A \cdot (T_c - T_{amb}) + El \cdot \Delta m_{met} + QSOL/f,$$

Eq.(III.5)

onde: sub-índice "c" indica propriedade do condensador,

Δm_{met} = massa admitida de metanol ao condensador, em kg,

f = fator de redução da energia solar global incidente, representando empiricamente a radiação difusa,

U = coeficiente global de troca de calor, que inclui os coeficientes de troca por convecção h_c e por radiação h_r ;

tem-se então:

$$U = h_c + h_r. \quad \text{Eq.(III.6)}$$

Para o evaporador vale a mesma equação:

$$(m \cdot c)_e \cdot \frac{\partial T_e}{\partial t} = -U \cdot A \cdot (T_e - T_{amb}) + El \cdot \Delta m_{met},$$

Eq.(III.7)

exceto pela ausência do termo relativo à radiação solar.

Por ser considerada a diferença de temperatura entre o interior do evaporador e o gabinete, supõe-se que o evaporador inicia o ciclo a zero °C, e não à temperatura ambiente.

Coletor Multitubular

Para o modelo escolhido, considerou-se dois elementos em série, como mostrado na fig. III.1:

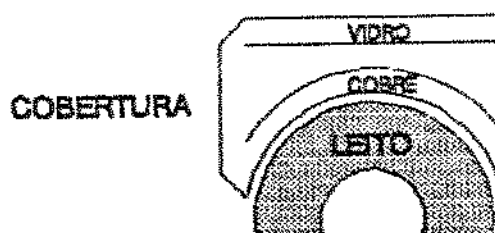


Fig. III.1. Representação do coletor como composto por dois sistemas em série: cobertura e leito.

Um elemento externo (cobertura) que, por simplificação, foi tomado como sendo de parâmetros concentrados, englobando todo o material externo ao leito, incluindo-se aqui o tubo de cobre, o espaço existente entre o tubo e a cobertura, e a cobertura de vidro.

Esta simplificação é válida enquanto se puder desprezar a diferença de temperatura entre o tubo de cobre e a cobertura de vidro. Desta forma, o valor representativo de temperatura que se obtém para este elemento é suficiente para a modelagem do comportamento do coletor. Utilizou-se então a equação (III.5), sendo que as parcelas de troca de calor (lado direito) agora são: um entre a cobertura e o meio externo, expresso por:

$$U_e \cdot A \cdot (T_c - T_{amb}) + Q_{SOL}, \quad \text{Eq. (III.8)}$$

outro entre a cobertura e o leito:

$$U_i \cdot A \cdot (T_c - T_{el}), \quad \text{Eq. (III.9)}$$

sendo:

U_e = coeficiente global externo,

U_i = coeficiente global interno,

T_{el} = temperatura na fronteira externa do leito.

Note-se que a radiação solar é interpretada como incidindo sobre o vidro. Considerando-se este como totalmente transparente à radiação e sendo sua inércia térmica desprezível em relação ao coletor, sua massa não foi levada em conta nos cálculos.

Os dois coeficientes globais (U_e e U_i) englobam também as resistências internas dos componentes da cobertura.

Um elemento interno (leito adsorativo), que foi analisado segundo o conceito de parâmetros distribuídos. Utilizou-se então as equações (II.16, 17 e 18), desprezando - se o gradiente angular de temperatura. No termo de difusividade térmica α estão incluídos os efeitos de calor latente do metanol, conforme CARNAHAN et alii (1969):

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c} = \frac{k}{\sum_{el} (\rho \cdot c) + (\Delta h_{met} \cdot \Delta m_{met} / \Delta T_{el})} \quad \text{Eq. (III.10)}$$

onde:

Δh_{met} = entalpia de adsorção do metanol, em kJ/kg

Δm_{met} = massa sorvida de metanol, kg

ΔT_{el} = variação de temperatura da região em que se dá a sorção, em °C.

Além deste modelo, duas variações foram consideradas para a modelagem do coletor multitubular, que é o elemento principal na análise do desempenho do refrigerador solar:

- Uma simplificação em relação ao modelo acima descrito, em que todos os gradientes internos são desprezados, reduzindo a descrição do coletor multitubular a um sistema de parâmetros concentrados, semelhante ao evaporador e ao condensador.
- Uma representação que inclui o gradiente angular, ou seja, a diferença de comportamento no leito adsorativo em função do ângulo θ , que representa a inclinação da radiação incidente sobre cada ponto do tubo.

III.2. - MÉTODOS

III.2.1. - HIPÓTESES E SIMPLIFICAÇÕES

Todos os balanços do presente trabalho são realizados numericamente, o que implica em discretização dos termos diferenciais das equações utilizadas, de forma que os balanços são executados repetidamente a cada pequeno intervalo de tempo Δt , correspondente ao diferencial "dt". O mesmo se aplica a outras variáveis, como exposto na sequência deste capítulo.

A hipótese fundamental para o balanço de massa no leito, como já exposto no item (II.3.1.), é considerar que o processo de difusão do metanol é suficientemente rápido para não limitar a velocidade da sorção. Isto implica em assumir uma pressão uniforme em todo o leito.

Assume-se também que a massa de metanol permanece constante em todo o leito durante os períodos em que o coletor está fechado (fases isostéricas), o que é uma simplificação, baseada no fato de a espessura do leito ser relativamente pequena.

Para as fases isobáricas, onde há dessorção ou adsorção, calcula-se a massa de metanol para cada posição radial no leito, segundo a equação D-A em função da temperatura nesta posição e da pressão média do leito.

Em sequência à exposição dos itens (II.3.1., 3.2. e 3.3.), nos balanços de massa e energia no leito adsorativo considera-se as seguintes hipóteses, agrupadas segundo:

- a - geometria,
- b - propriedades físicas, e
- c - balanços de massa e energia.

a - geometria:

a1 - o leito é um meio homogêneo onde o fluxo de calor é limitado pela condutividade térmica do leito. Esta hipótese se associa também ao balanço de massa, uma vez que implica em desconsiderar as perdas de carga devidas ao escoamento do metanol (vide item III.2.1.1.).

a2 - a condutividade térmica do leito k é constante, e ajustada de forma a aproximar o gradiente radial de temperatura registrado durante o ciclo real.

a3 - o tubo é infinitamente longo, ou seja, os efeitos de ponta são desprezados.

b - propriedades físicas:

b1 - os coeficientes de troca de calor por convecção e radiação que compõem o coeficiente global U de cada interface não são conhecidos, assumindo-se por isso valores típicos estimados de acordo com o comportamento transiente apresentado pelo ciclo real. Para os coeficientes de troca de calor por convecção e radiação externos eq. (II.21), foi calculada uma aproximação aos coeficientes reais do ciclo n 52, através de um algoritmo de minimização da somatória dos erros absolutos entre as temperaturas médias simulada e real interpolada do coletor a cada passo de tempo entre 6:00 e 11:00 horas.

b2 - os coeficientes de troca de calor do evaporador e do condensador não são conhecidos, e por isso foram estimados, bem como suas capacidades térmicas, em função de suas respectivas respostas transientes como registradas no ciclo real.

b3 - a entalpia de adsorção e o calor latente de vaporização do metanol são considerados constantes.

c - balanços de massa e energia.

c1 - a massa e o calor específico do vidro são desprezados, já que o vidro tem alta transmitância à radiação solar.

c2 - a pressão do leito durante a fase isobárica dessortiva é igual à pressão do condensador, e durante a fase isobárica adsortiva é igual à pressão do evaporador.

c3 - somente existe fluxo de energia na direção radial, independentemente do ângulo de incidência da radiação solar (exceto para a variante bidimensional, apresentada nos itens III - 2.2.1. e no anexo VII.3.).

c4 - para a região do coletor externa ao leito, admitiu-se que o conjunto formado pelo tubo de cobre, cobertura de vidro, e camada de ar existente entre eles constitui um único elemento de parâmetros concentrados.

c5 - as perdas de energia para o ambiente através da caixa do coletor são incluídas no coeficiente global U_c da interface entre a cobertura e o ambiente externo.

c6 - os critérios para as mudanças de fase são:

- mudança da fase isostérica de aquecimento (fase 1) para a fase isobárica de dessorção (fase 2):
é executada quando a pressão do coletor se iguala ou ultrapassa a pressão do condensador dentro do passo de tempo.

- mudança para a fase isostérica de resfriamento (fase 3):
é executada quando o aumento da temperatura média do coletor permanece nulo ou negativo durante dois passos de tempo sucessivos.

- mudança para a fase isobárica de adsorção (fase 4):
é executada quando a pressão do coletor se torna igual ou menor que a pressão do evaporador.

- c7 - a extremidade interna do coletor está termicamente isolada.
- c8 - o metanol em fase vapor que sai do leito não troca calor com o meio ao seu redor.
- c9 - a energia solar incidente na cobertura do coletor é corrigida segundo DUFFIE e BECKMAN (1974) por um fator empírico causado pelo ângulo de incidência da energia solar, e que é aproximada pela senóide:

$$ab = [\text{sen} (2\pi.t / 1440)]^{1,5}, \quad \text{Eq. (III.5)}$$

sendo:

ab = absortância,

t = tempo em minutos, a partir do nascer do sol.

- c10 - quando o coletor está fechado, não há sorção localizada de metanol.

III.2.2. - RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES

III.2.2.1. - Métodos Numéricos Utilizados

Leito: para resolver o balanço expresso na equação (II.16), juntamente com suas condições de contorno, utilizou-se o método implícito de diferenças finitas, que se constitui basicamente na discretização das equações (II.16, 17 e 18) pela expansão de seus termos em séries de Taylor, e sua aplicação ao longo de pontos chamados "pontos nodais". Estes se distribuem, no caso, uniformemente ao longo das coordenadas consideradas: o raio do coletor e o tempo.

As equações discretizadas tomam a seguinte forma:

discretização de (II.16):

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \frac{1}{r_i} \left(\frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{2\Delta r} \right) + \frac{T_i^{n+1} - 2T_{i-1}^{n+1} + T_{i-2}^{n+1}}{(\Delta r)^2}$$

Eq. (III.6)

discretização de (II.17):

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{T_1^{n+1} - T_1^n}{\Delta r} = \frac{2}{(\Delta r)^2} (T_2^{n+1} - T_1^{n+1})$$

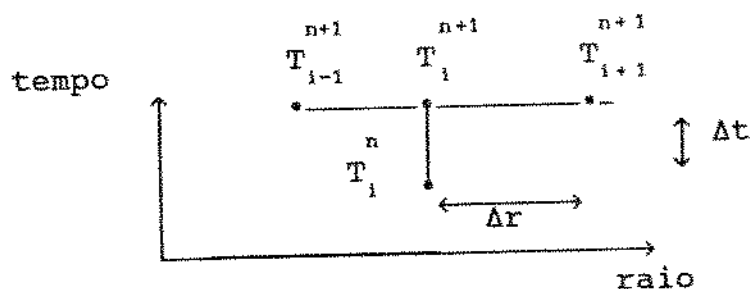
Eq. (III.7)

discretização de (II.18):

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{T_n^{n+1} - T_n^n}{\Delta t} = \left(\frac{1}{r_n} + \frac{2\Delta r}{(\Delta r)^2} \right) \cdot \left(\frac{-h \cdot T_n^{n+1}}{K} + \frac{h \cdot T_\infty}{K} \right) + \frac{2}{(\Delta r)^2} (T_{n-1}^{n+1} - T_n^{n+1})$$

Eq. (III.8)

Tomando-se dois eixos perpendiculares podemos esquematizar a discretização como abaixo:



Os índices superiores e inferiores referem-se, respectivamente, as posições no tempo e no espaço. No método implícito somente os pontos no tempo n são conhecidos, e os pontos no tempo $n+1$ são incógnitas que formam um sistema de equações, resolvido pelo algoritmo de Thomson, que é exato.

A estabilidade do algoritmo de diferenças finitas adotado é incondicional (vide fluxograma no anexo VII.1. e listagem do programa no anexo VII.3.).

Cobertura, condensador e evaporador: as equações diferenciais ordinárias que representam o balanço do condensador, evaporador e coletor são resolvidas pelo algoritmo de Runge-Kutta de quarta ordem.

Dados do ciclo experimental: os dados de energia solar e temperatura ambiente foram interpolados entre cada período de meia hora por um algoritmo de splines cúbicas, segundo TAO (1987), formando uma curva que aproxima a real passando por todos os pontos experimentais e leva em consideração a continuidade da curva e da suas derivadas primeira e segunda.

Ajuste de coeficientes: a aproximação dos coeficientes simulados de troca de calor com o exterior aos coeficientes reais do ciclo n 52 foi realizada através de um algoritmo de busca direta univariado (EDGAR & HIMMELBLAU, 1989) em que a função objetivo, somatória dos erros absolutos entre as temperaturas médias simulada e real interpolada do coletor a cada passo de tempo, é minimizada sequencialmente para cada coeficiente, durante o período entre 6:00 e 11:00 horas.

Variante bidimensional: a variante bidimensional (com gradiente angular) citada no item c3 da lista de hipóteses foi desenvolvida com o objetivo de avaliar a importância da distribuição de energia solar aos pontos do tubo que recebem menos radiação devido à sua inclinação crescente em relação ao plano horizontal.

Para isto foi considerada a equação (II.16) completa, levando - se em conta a posição radial e angular no interior do leito adsortivo. O método de resolução é também o das diferenças finitas, porém modificado para acomodar as duas variáveis espaciais.

Esta aplicação se chama de direções alternantes, e é descrito por CARNAHAN et Alii (1969). A estrutura do programa é a mesma do modelo principal, com exceção do esquema de diferenças finitas, que se torna consideravelmente mais complexo em função do maior número de variáveis e de condições de contorno nas interfaces. Encontra-se no anexo VII.3. a parte da listagem do programa que contém as equações do esquema de diferenças finitas.

III.2.2.2. - Descrição do Programa

Os modelos numéricos foram elaborados com a versão 5.5 do software Turbo Pascal Disk Tutor, da Borland Inc.

A escolha desta linguagem se deve aos seguintes motivos:

- a - o Pascal, como linguagem estruturada, contribue para a organização lógica do programa, tanto na utilização de equações de variáveis contínuas, quanto no uso de comandos de lógica sequencial como no caso de desvios condicionais para contadores, limitadores de loops, etc.

- b - As correções e revisões de lógica são facilitadas tanto pelas exigências estruturais da linguagem quanto pelos recursos de "debug" e de edição oferecidos pelo software.
- c - O formato didático da linguagem facilita a análise e eventual continuidade do trabalho por parte de outros estudantes.
- d - A facilidade em se gerar resultados em listagens tipo texto (ASCII) que podem ser imediatamente analisadas em outros programas, como planilhas eletrônicas.
- e - A mesma versão ou versões semelhantes deste software podem executar o programa em equipamentos mais rápidos, reduzindo o tempo de análise e viabilizando a utilização de algoritmos mais complexos em um projeto de otimização, por exemplo.

O programa se compõe de três partes principais: declaração, inicialização e varredura.

As duas primeiras partes são essencialmente descritivas dos elementos que tomam parte na execução do programa, e tem caráter obrigatório no caso do Pascal. A varredura se compõe dos algoritmos que resolvem as equações deduzidas. Pode-se apresentar estas partes subdivididas em:

- Declaração de:**
- constantes.
 - variáveis.
 - funções.
- Inicialização de:**
- variáveis a serem otimizadas.
 - variável a ser varrida (variada em uma corrida).
 - variáveis escalares.
 - variáveis vetoriais e matriciais (indexadas).
- Varredura:**
- sistema de equações diferenciais
 - algoritmo de diferenças finitas incluindo:
 - equações de termos explícitos
 - resolução da matriz tridiagonal
 - entrada nas isóbaras e cálculo das condições
 - de equilíbrio
- Finalização:**
- cálculo dos coeficientes de performance.
 - otimização de parâmetros.

IV - RESULTADOS E ANÁLISES

Todos os resultados comparativos foram obtidos a partir de dados de energia solar incidente e temperatura ambiente do ciclo real número 52 conforme registrado por SILVEIRA Jr. (1990). As análises apresentadas após as comparações de desempenho também partem destes dados ambientais. Optou-se por esta forma em preferência à utilização de curvas senoidais típicas de evolução da energia solar incidente e temperatura ambiente com o objetivo de tornar a exposição mais concreta.

IV.1. - VALIDAÇÃO DO MODELO

Validação Lógica:

O algoritmo de Runge - Kutta utilizado foi testado pela aplicação de uma variação em degrau na variável independente, e apresentou erros da ordem de 10^{-6} em relação à solução analítica de uma variação em degrau para os intervalos de tempo adotados nas simulações.

O algoritmo de diferenças finitas é derivado diretamente a partir das equações de balanço, tornando trivial a verificação da consistência lógica do algoritmo para os casos mais simples, como é o modelo adotado para o leito adsortivo. Contudo, a estabilidade e a convergência do modelo foram verificadas também pela aplicação de uma variação em degrau na incidência de energia solar sobre o coletor fechado (COUGANOWR & KOPPEL, 1965 e WEBER, 1973).

A curva representada por (Δ) na fig. IV.1. mostra a reação do coletor a este estímulo.

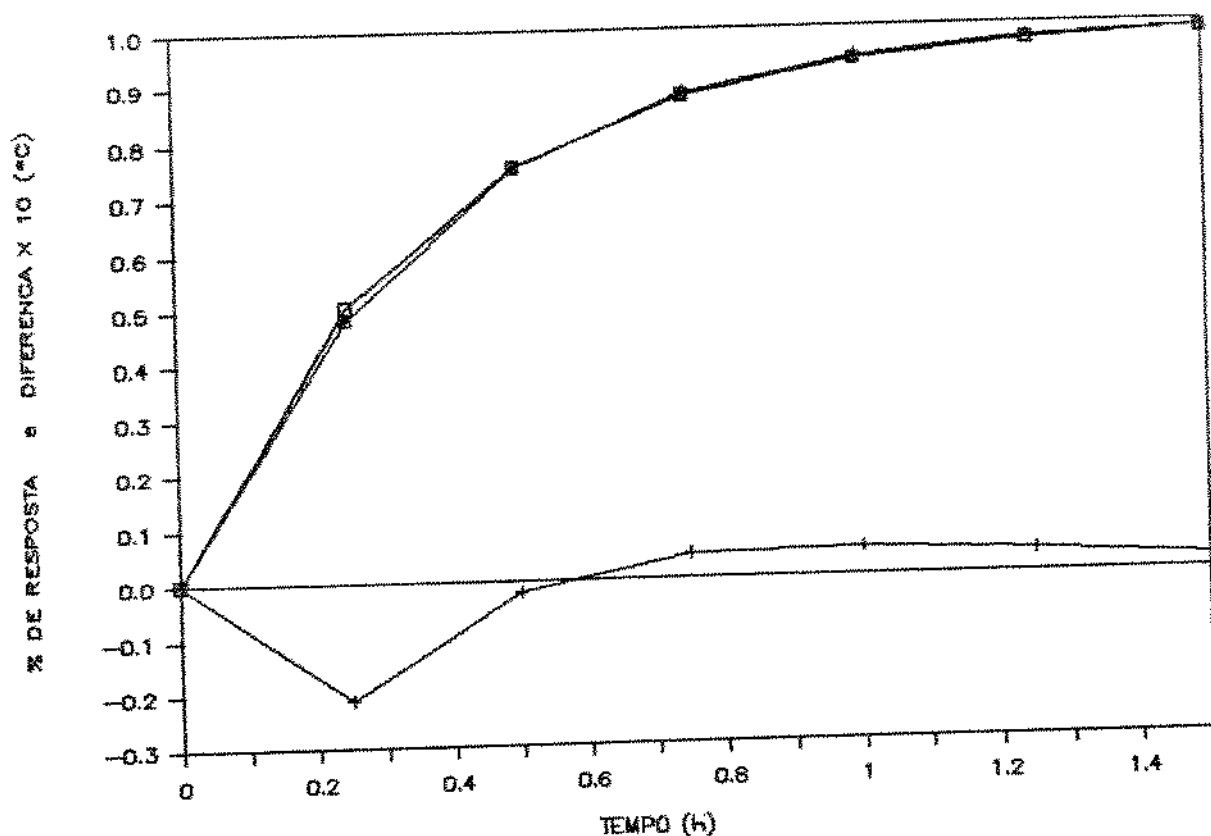


Fig. IV.1. Resposta do coletor a variação em degrau da radiação incidente, e comparação com a resposta de um sistema de 1ª ordem com tempo característico de 21 minutos.

□: sistema de 1ª ordem com $\tau = 21$ min. (fração da resposta final do sistema à variação em degrau).

Δ: simulação do coletor. (fração da resposta final).

+: diferença x 10 (em °C).

As condições iniciais foram:

temperatura ambiente = 20 °C
 temperatura do coletor = 20 °C
 energia solar incidente = 0 W/m²

No instante $t = 0$, muda-se a energia solar incidente para um valor constante de 1000 W/m², permanecendo a temperatura ambiente constante. A temperatura média do coletor, a partir deste instante, aumenta até estabilizar-se em um novo patamar de 74 °C.

Este comportamento revela que a resposta dinâmica do coletor se assemelha à de um sistema de 1ª ordem com tempo característico da ordem de 21 minutos. Note-se que o modelo do coletor contempla dois elementos dinâmicos em série com interação, conforme COUGANOWR & KOPPEL (1965) e WEBER (1973).

A mesma simulação mostra a precisão crescente da simulação à medida que se refina os passos de tempo (DTAU). Este teste foi realizado em quatro repetições, sendo que a cada simulação se reduzia o passo de tempo, desde 28,125 segundos, para 14,06, 7,03, e finalmente 3,516 segundos. Comparou-se então as curvas de resposta da temperatura média do coletor.

Na figura IV.2. (página seguinte) estão plotadas as diferenças entre curvas obtidas com os valores de DTAU acima. Desta forma, a curva com (□) mostra a diferença entre as curvas obtidas com os dois primeiros valores de DTAU. Note-se que a maior diferença foi da ordem de um grau, registrada em seguida à aplicação do aumento em degrau da energia incidente. Procedeu-se analogamente até a curva com (◇) que mostra uma diferença máxima da ordem de 0,25 °C, para os dois menores valores de DTAU.

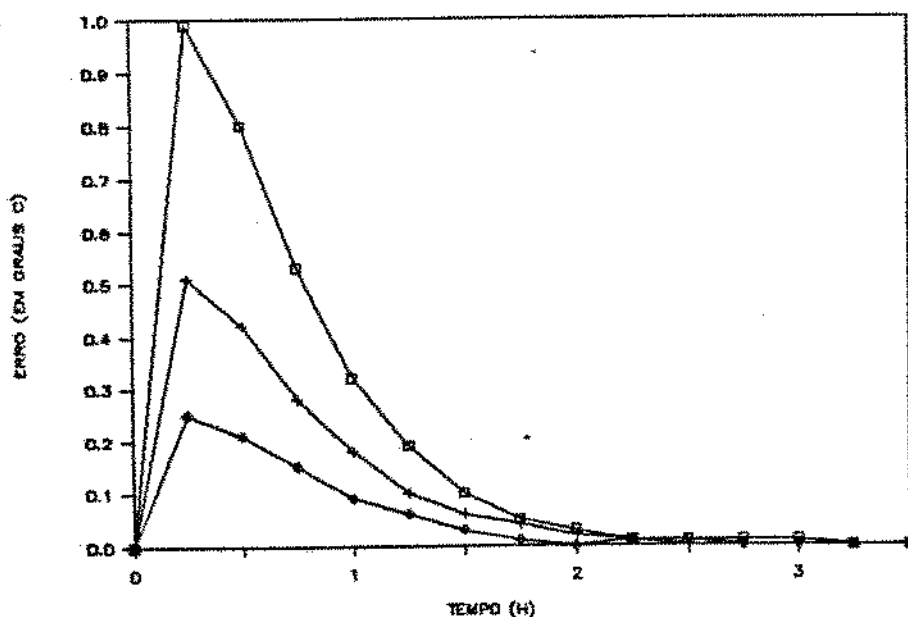


Fig. IV.2. Erro de convergência com DTAU decrescente para a resposta ao estímulo em degrau apresentado na figura IV.1. (legenda na próxima página).

□: erro em °C comparando-se as simulações executadas com DTAU=28,125 e 14,06 segundos.

+: erro em °C para 14,06 e 7,03 segundos.

◇: erro em °C para 7,03 e 3,516 segundos.

Destas curvas fica evidente que:

a - o erro de discretização diminui à medida que se reduz o passo de tempo, atestando a estabilidade do modelo;

b - todas as curvas apresentam erro decrescente à medida em que a mudança de temperatura se torna mais lenta, e todas convergem para o mesmo patamar, atestando a convergência do modelo.

c - o erro de discretização do modelo é maior nos instantes em que seu gradiente interno é maior, e se reduz à medida em que o novo equilíbrio é aproximado.

Nas 14 corridas para comparação com resultados experimentais foram utilizados:

Incremento de tempo (Δt) = DTAU = 7,03 s.

Incremento espacial (Δx) = DR = 0,002 m.

Tolerância = 10^{-3} °C.

Validação das Hipóteses:

O objetivo principal das simplificações foi manter o programa simples e de somente acrescentar ao modelo informações fundamentais à sua validação.

As hipóteses listadas no item III - 2.1.2. são relacionadas e justificadas abaixo:

a - geometria:

a1 - o leito é um meio homogêneo onde o fluxo de calor é limitado pela condutividade térmica do leito.

J.: Esta hipótese se justifica pelos trabalhos citados no item II.4.1.

a2 -a condutividade térmica do leito k é constante, e ajustada de forma a aproximar o gradiente radial de temperatura registrado durante o ciclo real.

J.: De forma geral, adotou-se propriedades físicas propriedades físicas constantes, e os resultados obtidos nas simulações mostram que os desvios entre simulação e ciclo real se originam nas flutuações da intensidade da energia incidente. Visou-se também evitar a inclusão de polinômios que aumentassem o tempo de corrida das simulações.

a3 -o tubo é infinitamente longo, ou seja, os efeitos de ponta são desprezados.

J.: Os gradientes axiais detectados por Silveira Jr. (1990) no ciclo 52, além de inferiores a 2°C , não mostram tendência definida, o que impossibilita uma confrontação satisfatória com o modelo. Deve-se também considerar que a área de troca de calor das extremidades é muito pequena em relação à área total.

b - propriedades físicas:

b1 -os coeficientes de troca de calor por convecção e radiação que compõem o coeficiente global U de cada interface não são conhecidos, assumindo-se por isso valores típicos estimados de acordo com o comportamento transiente apresentado pelo ciclo real.

J.: A determinação de todos os coeficientes implica em um trabalho de otimização, que está fora do presente escopo. Para os coeficientes de troca de calor por convecção e

radiação externos eq. (II.21), foi calculada uma aproximação aos coeficientes reais do ciclo n 52, através de um algoritmo de minimização da somatória dos erros absolutos entre as temperaturas médias simulada e real interpolada do coletor a cada passo de tempo entre 6:00 e 11:00 horas.

b2 -os coeficientes de troca de calor do evaporador e do condensador não são conhecidos, e por isso foram estimados, bem como suas capacidades térmicas, em função de suas respectivas respostas transientes como registradas no ciclo real.

J.: As estimativas são tentativas não otimizadas.

b3 -a entalpia de adsorção e o calor latente de vaporização do metanol são considerados constantes.

J.: Vide item a2.

c - balanços de massa e energia.

c1 -a massa e o calor específico do vidro são desprezados, já que o vidro tem alta transmitância à radiação solar.

J.: Sendo o vidro praticamente transparente à radiação solar, sua inércia térmica é desprezável.

c2 -a pressão do leito durante a fase isobárica dessortiva é igual à pressão do condensador, e durante a fase isobárica adsortiva é igual à pressão do evaporador.

J.: Esta hipótese equivale a desprezar a perda de carga devida ao escoamento entre os compartimentos do refrigerador. Vide item a1.

c3 -somente existe fluxo de energia na direção radial, independentemente do ângulo de incidência da radiação solar (exceto para a variante bidimensional, considerada no item III - 2.2.1.).

J.: Apresenta-se mais adiante resultados qualitativos relativos ao modelo que inclui o gradiente angular de temperatura no leito adsortivo.

c4 -para a região do coletor externa ao leito, admitiu-se que o conjunto formado pelo tubo de cobre, cobertura de vidro, e camada de ar existente entre eles constitui um único elemento de parâmetros concentrados.

J.: Conforme se mostra adiante, todo o coletor pode ser avaliado dentro do conceito de parâmetros concentrados. A motivação para a adoção do sistema de parâmetros distribuídos no leito é poder avaliar a influência de sua condutividade térmica e dimensões sobre o desempenho do refrigerador.

c5 -as perdas de energia para o ambiente através da caixa do coletor são incluídas no coeficiente global U_c da interface entre a cobertura e o ambiente externo.

J.: É uma parcela extremamente pequena devido à existência de isolamento térmico nas paredes da caixa.

c6 -os critérios para as mudanças de fase são:

- mudança da fase isostérica de aquecimento (fase 1) para a fase isobárica de dessorção (fase 2):

é executada quando a pressão do coletor se iguala ou

ultrapassa a pressão do condensador dentro do passo de tempo.

- mudança para a fase isostérica de resfriamento (fase 3): é executada quando o aumento da temperatura média do coletor permanece nulo ou negativo durante dois passos de tempo sucessivos.
- mudança para a fase isobárica de adsorção (fase 4): é executada quando a pressão do coletor se torna igual ou menor que a pressão do evaporador.

J.: São critérios lógicos equivalentes a ações tomadas durante um ciclo real.

c7 -a extremidade interna do leito está termicamente isolada.

J.: A perda de energia do leito para o espaço central ocupado somente por vapor de metanol é desprezada, devido à baixa condutividade térmica e calor específico do vapor de metanol.

c8 -o metanol em fase vapor que sai do leito não troca calor com o meio ao seu redor.

J.: Vide hipótese anterior.

c9 - a energia solar incidente na cobertura do coletor é corrigida segundo DUFFIE e BECKMAN (1974) por um fator empírico causado pelo ângulo de incidência da energia solar, e que é aproximada pela senóide:

$$ab = [\text{sen} (2\pi.t / 1440)]^{1,5}, \quad \text{Eq. (III.5)}$$

sendo:

ab = absortância,

t = tempo em minutos, a partir do nascer do sol.

c10 - quando o coletor está fechado, não há sorção localizada de metanol.

J.: O chamado "heat pipe effect" é desprezado em função da pequena espessura do leito.

Validação do Comportamento

Segue-se a comparação do modelo com o ciclo real de número 52, apresentado por SILVEIRA Jr. (1990).

Todos os resultados comparativos com ciclo 52 apresentados abaixo, exceto indicação contrária, foram obtidos através de ajustes preliminares dos coeficientes de transferência de calor com base em valores típicos obtidos na literatura (DUFFIE e BECKMAN, 1974) e são listados abaixo.

As únicas exceções são os coeficientes externos HCEX e EV (vide abaixo), que foram otimizados para o período de 6:00 a 11:00 horas.

Tab. IV.1. Valores utilizados nas simulações.

HCIN = $45 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	(coeficiente de contato entre tubo e leite),
HCEX = $7,46 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	(coeficiente de troca de calor da cobertura do coletor para o ambiente por convecção),
KR = $0,04 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$	(condutividade térmica do leite adsortivo),
EV = 0,26	(emissividade da cobertura do coletor),
EIN = 0,9	(emissividade do coletor para o leite).

Tab. IV.2. Comparação simulação vs. ciclo real 52

	COPTC	TMAX ($^\circ\text{C}$)	MASSA CICLADA (kg)
ciclo real	0,3487	123,8	1,375
ciclo simulado	0,3475	121,1	1,311

IV.1.1. - Comportamento da Pressão do Leito Adsorativo.

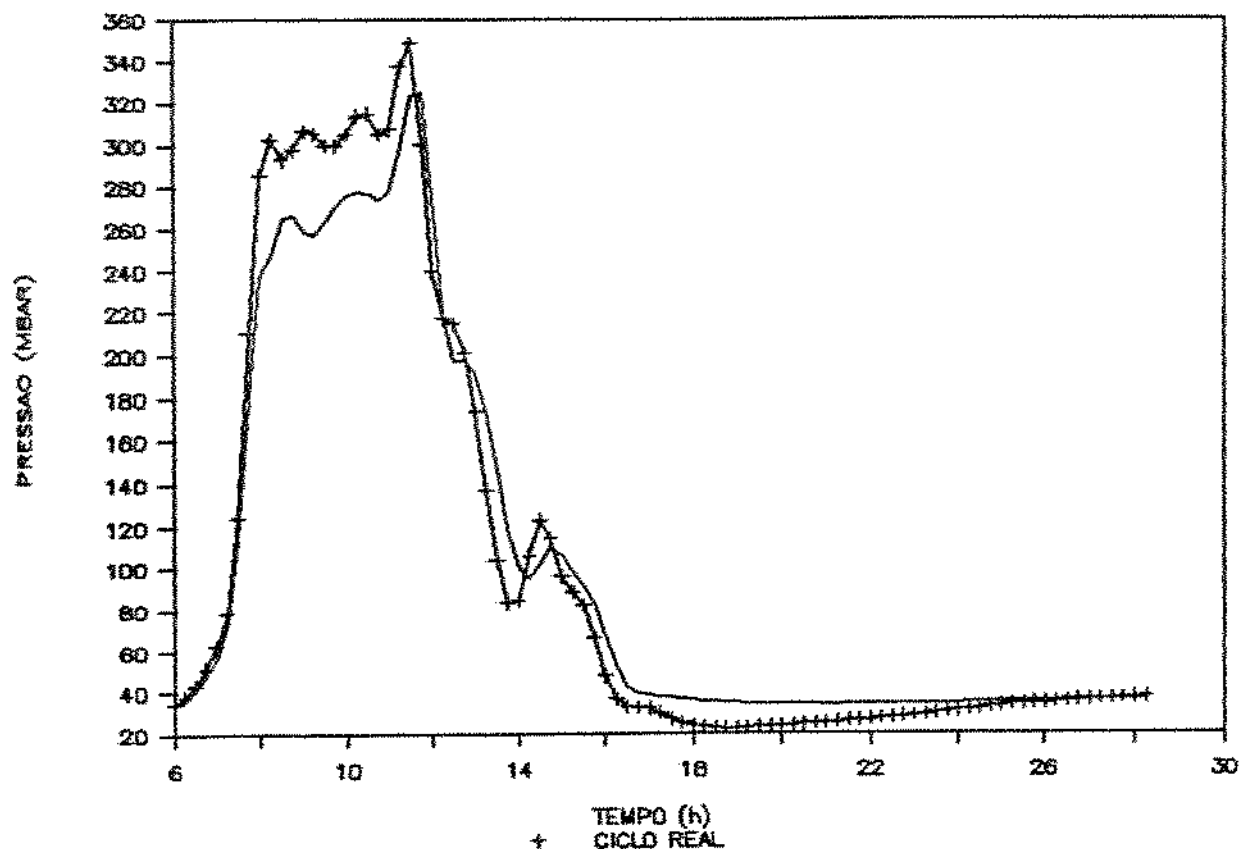


Fig. IV.3. Pressão do leito adsorativo.
Ciclo real comparado com ciclo simulado.

Como se pode ver na fig. IV.3, a pressão simulada varia coerentemente com a pressão do ciclo real, porém com valores sempre abaixo desta durante o período de pressão mais elevada. A única explicação encontrada para tal tendência foi a presença de pequenas quantidades de substâncias como ar ou água no interior do coletor após seu carregamento com metanol. Estas substâncias teriam causado o aumento da pressão do leito acima dos valores mostrados pela simulação.

IV.1.2. - Comportamento da Temperatura do Leito Adsorativo.

Nas figuras IV.4. e IV.5. observa-se a comparação entre as temperaturas real e simulada. A diferença é variável e mais intensa quando os transientes de energia incidente são mais rápidos, como ocorre principalmente após as 11:30 da manhã. Note-se também que o período das 6:00 às 11:00 teve a diferença minimizada visando um ajuste em função de HCEX e EV. Neste período, a diferença foi sempre inferior a $\pm 4^{\circ}\text{C}$.

Deve-se notar que, devido ao comportamento da temperatura real, o ótimo obtido não é único, podendo-se obter outros pares de valores para os coeficientes HCEX e EV. Nesta minimização, o menor erro médio encontrado por tentativa foi $1,74^{\circ}\text{C}$.

Considera-se que os desvios se devem a duas causas principais:

- a - a entrada de dados no programa para o balanço de energia é feito a cada trinta minutos, com interpolação nos tempos intermediários. Como os valores reais de temperatura são resposta em tempo real, e as passagens de nuvens são eventos tipicamente discretos, com transições rápidas, o modelo respondeu sempre mais lentamente. A solução seria aumentar a frequência de tomada de dados no ciclo experimental.
- b - variações momentâneas das perdas por convecção teriam impacto sobre a evolução da temperatura, e no ciclo real pode ter havido picos de vento intensos, além de mudanças significativas para diferentes períodos do ciclo.

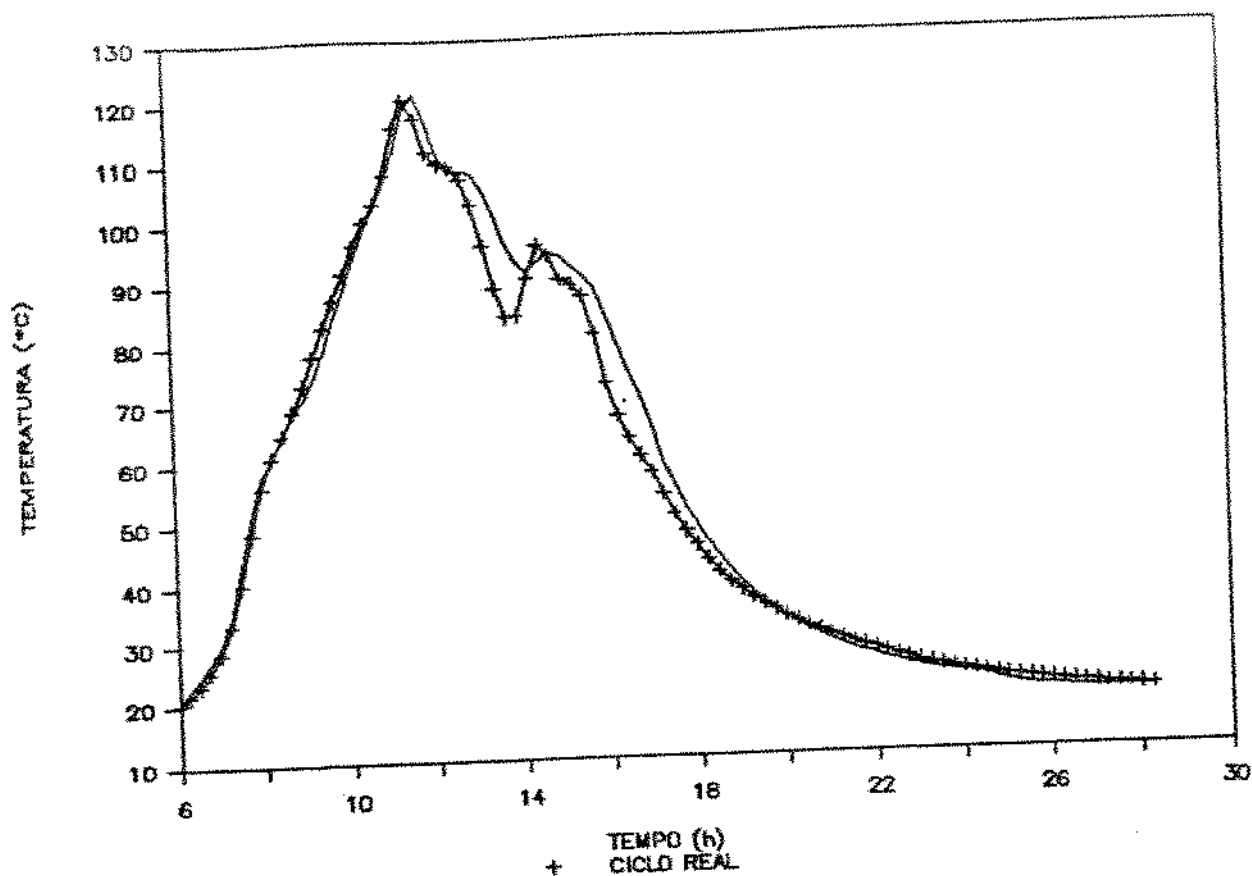


Fig. IV.4. Temperatura do leito adsortivo.
Ciclo real comparado com ciclo simulado.

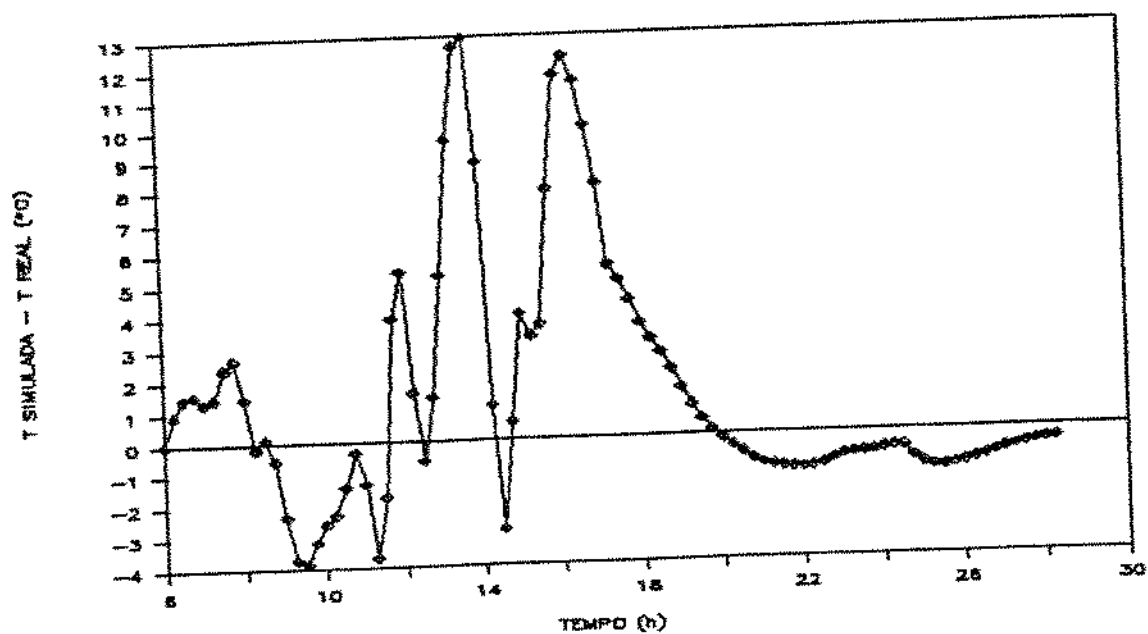


Fig. IV.5. Temperatura do leito adsortivo.
Diferença entre ciclo real e ciclo simulado.

IV.1.3. - Diagrama de Estado

As diferenças mais notáveis aparecem nas isóbaras, onde a pressão é função também do desempenho do condensador e do evaporador. Como na prática as fases "isobáricas" apresentam variação de pressão, a simulação de um ciclo exige que se assumam valores de massa e coeficientes de troca de calor que confirmem os resultados experimentais. Deste modo se obtém as curvaturas das "pseudo isóbaras".

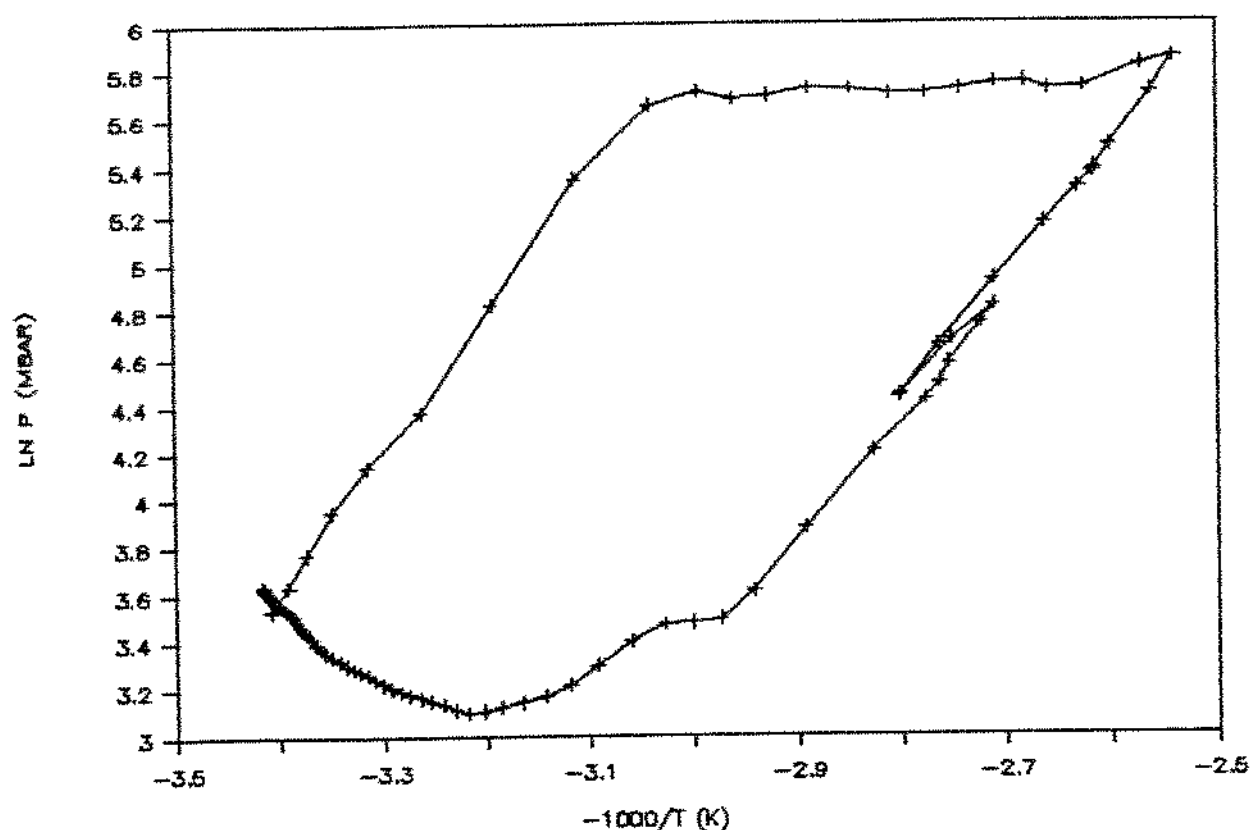


Fig. IV.6. Diagrama de estado do ciclo 52.

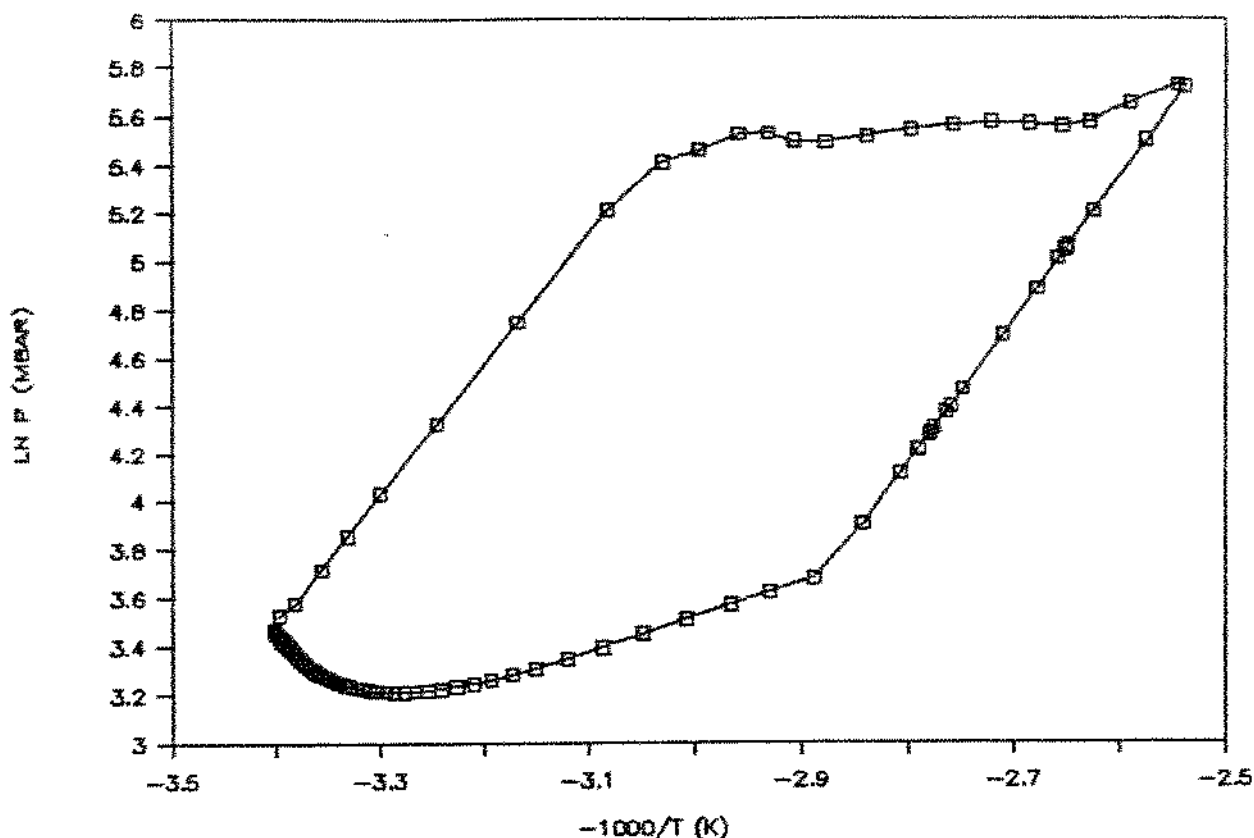


Fig. IV.7. Diagrama de estado do ciclo simulado.

IV.2. - ESTUDO DA SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA DO MODELO

Apresenta-se uma avaliação da sensibilidade da variável massa de metanol dessorvida aos parâmetros listados abaixo, que são variados em apenas três níveis. As faixas têm amplitude discreta, com variação de um só parâmetro por vez, mostrando apenas um esboço do que seria um estudo de sensibilidade propriamente dito.

Define-se sensibilidade como o quociente entre a variação do parâmetro de desempenho (Δy), no caso a massa dessorvida, e a variação do parâmetro (Δx) que influi no desempenho, ficando:

$$S = \Delta y / \Delta x$$

Pode-se ainda definir uma sensibilidade relativa que considera o quociente entre as variações relativas, obtendo-se:

$$S_R = (\Delta y/y) / (\Delta x/x)$$

Segundo EDGAR & HIMMELBLAU (1989) a sensibilidade relativa é mais adequada quando se compara a sensibilidade associada a parâmetros cujas ordens de grandeza sejam diferentes. Por este motivo avaliamos no presente trabalho a sensibilidade relativa.

Os seguintes parâmetros foram estudados:

Tab. IV.3. Parâmetros estudados quanto à sensibilidade.

EV	= emissividade da cobertura do coletor para o ambiente;
HCEX	= coeficiente de troca de calor por convecção entre a cobertura do coletor e o ambiente;
KR	= condutividade térmica do leito adsortivo.

Tab. IV.4. Efeito da troca de calor para o ambiente por convecção.

HCEX (W/m ² .°C)	MDES (kg)	Sensibilidade relativa
6	1,54	
7	1,44	S _R = 0,61
8	1,29	

Tab.IV.5. Efeito da emissividade da cobertura para o ambiente.

EV	MDES (kg)	Sensibilidade relativa
0,1	1,52	$S_R = 0,13$
0,2	1,44	
0,3	1,33	

Tab.IV.6. Efeito da condutividade térmica do leito.

KR (W/m . °C)	MDES (kg)	Sensibilidade relativa
0,02	1,43	$S_R = 0,05$
0,04	1,44	
0,06	1,45	

Sobre estes resultados se deve comentar:

- a - A baixa sensibilidade à variação de KR é devida principalmente à pouca espessura do leito.
- b - O valor mais alto da S_R de HCEX se deve em parte aos baixos valores de EV encontrados no ajuste de parâmetros.

IV.3. - UTILIZAÇÃO DO MODELO NA ESTIMATIVA DE POSSIBILIDADES DE GANHO NO DESEMPENHO DO REFRIGERADOR SOLAR

IV.3.1. - Utilização de outros tipos de carvão

Simulando o ciclo 52 com os parâmetros da equação D-A para outros carvões (Silveira Jr.,1990), obtém-se os seguintes desempenhos:

Tab. IV.7. Desempenho simulado de diferentes carvões
(vide legenda abaixo)

CARVÃO	COPTC	COPBS	M.CICL.	Wo	n	D
DEION	0.348	0.103	1.311	0.2669	2.0	-9.698E-7
AC-35	0.459	0.178	2.308	0.425	2.15	-5.02 E-7
AS	0.498	0.224	2.890	0.86	1.32	-2.57 E-4

COPTC = Coeficiente de performance teórico do ciclo, definido pela relação entre o efeito frigorífico obtido e a energia necessária para aquecer o reator da temperatura inicial do ciclo até a temperatura máxima (J/J).

COPBS = Coeficiente de performance bruto solar, definido pela relação entre o efeito frigorífico obtido e a energia solar total incidente sobre o reator (J/J).

M. CICL. = Massa de metanol desorvida e posteriormente adsorvida durante um ciclo completo (kg).

Wo = Parâmetro da equação D-A denominado volume máximo adsorvível (cm^3/g).

n, D = Constantes da equação D-A.

IV.3.2. - Aumento da massa de carvão ativo DEION

Esta série de simulações foi executada reduzindo-se progressivamente o raio interno do leito, aumentando assim seu volume e, por conseguinte, a massa de carvão. Iniciou-se com o valor real do protótipo - 11,0 mm, e chegou-se a um valor mínimo de 1,0 mm.

Como se vê na figura IV.8., o aumento da massa de metanol ciclada atingiu o máximo de 1,5 kg.

Note-se que a única mudança estrutural necessária em um teste real deste tipo seria a tela que reveste o lado interno do leito.

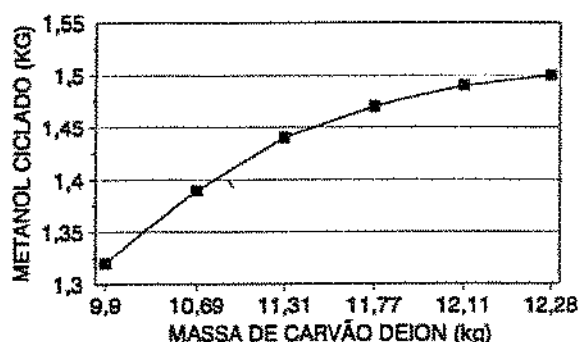


Fig IV.8. Massa ciclada de metanol em função da massa de carvão DEION.

IV.4. - OBSERVAÇÕES SOBRE OUTROS PARÂMETROS DO MODELO

IV.4.1. - Gradiente radial de temperatura no leito

Na fig. IV.9. é mostrada a variação radial de temperatura no leito adsortivo, para três valores de condutividade térmica. O valor máximo obtido por Silveira Jr. (1990) para o ciclo 52 foi $6,6^{\circ}\text{C}$.

Na curva com o valor tentativo adotado nas simulações anteriores ($k_1 = 0,04 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$) observa-se o "gradiente" máximo de $6,7^{\circ}\text{C}$, ou seja, uma diferença de $0,1^{\circ}\text{C}$ entre simulação e ciclo real. Mostra-se também, na mesma figura, o efeito do aumento de $k_1 = 0,04$ para $0,05$ e $0,06 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ sobre o gradiente em questão.

Esta breve análise aponta a faixa de condutividade térmica do leito, que pode ser refinada em um estudo específico de otimização.

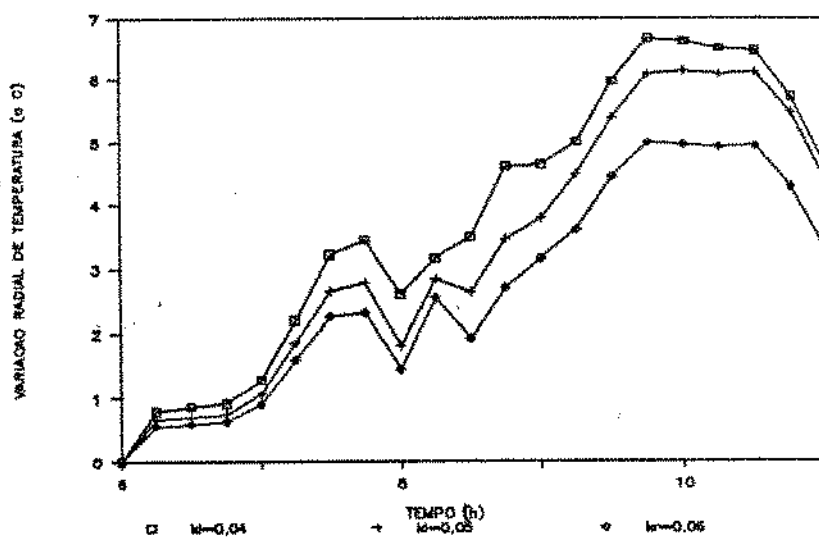


Fig. IV.9. Variação radial de temperatura em função da condutividade térmica do leito adsortivo.

IV.4.2. - Taxa de dessorção de metanol

Observa-se na figura IV.10. a evolução da massa dessorvida de metanol comparando ciclo 52 e simulação.

Nota-se que durante todo o processo de dessorção a diferença entre os resultados apresenta caráter oscilatório semelhante ao observado para a temperatura do coletor (vide fig. IV.5.). Somente os valores no final da isóbara de aquecimento mostram uma diferença sistemática em favor do ciclo real.

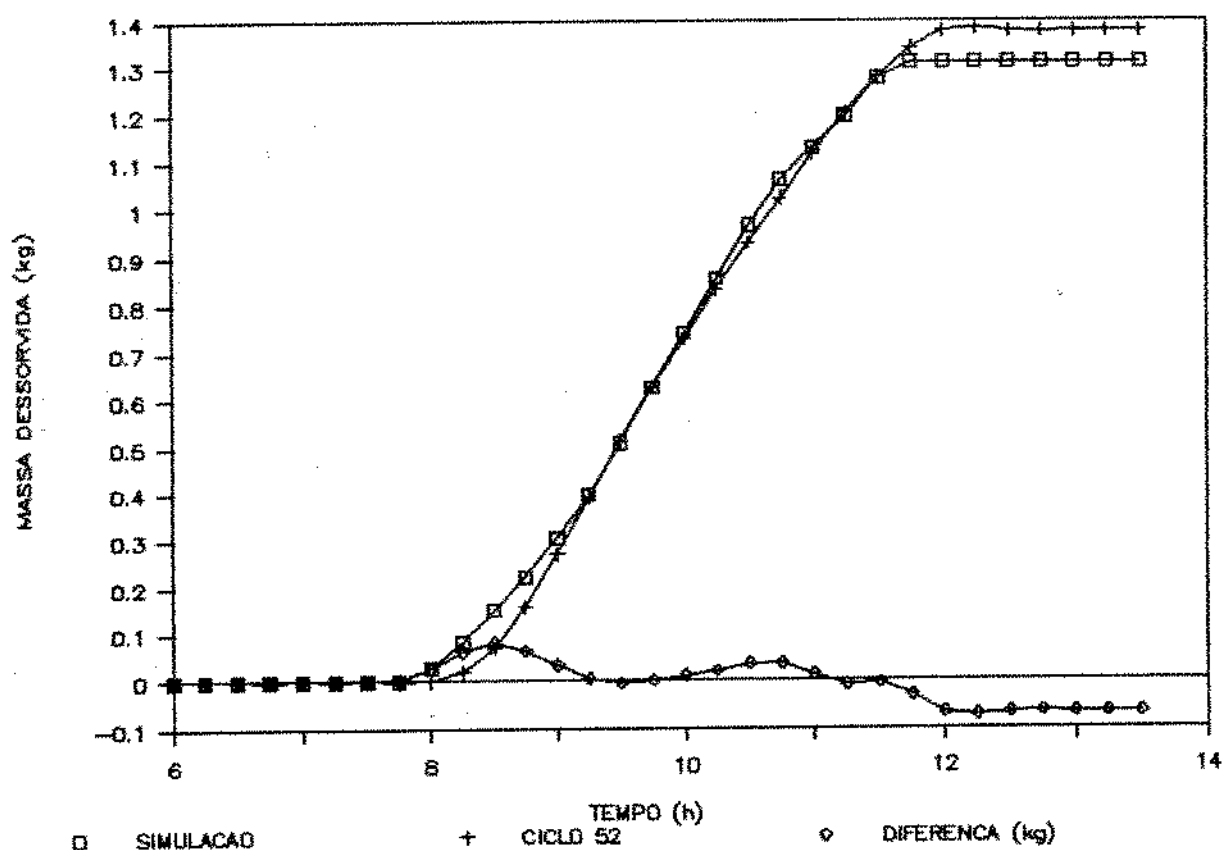


Fig. IV.10. Evolução da massa dessorvida para o ciclo real e simulação.

IV.5. - ANÁLISE DE ALGUMAS VARIAÇÕES DO MODELO PROPOSTO

Apresenta-se abaixo resultados obtidos tanto simplificando quanto aumentando o nível de detalhe na descrição do leito adsortivo.

IV.5.1. - Modelagem do leito por parâmetros concentrados.

Deve-se considerar inicialmente que a descrição por parâmetros concentrados, adotado na modelagem do condensador e evaporador, é praticamente a mais simples possível dentro de um modelo transiente.

Desconsiderando-se os gradientes internos do coletor multitubular, é ainda possível obter, como mostrado na figura IV.11., um simulação alternativa simplificada do ciclo real com a evolução da temperatura média do coletor muito semelhante à obtida com o modelo com gradiente radial escolhido para o presente trabalho.

Uma constatação imediata se dá no processo de ajuste dos dois modelos: o valor do coeficiente HCEX (troca de calor por convecção entre o coletor e o ambiente externo) aumenta, de 7,46 para 7,86 W/m² °C. Este aumento acontece como consequência da incorporação "forçada" da resistência térmica do leito ao coeficiente HCEX no modelo simplificado, já que o ajuste procura a minimização da diferença entre os dois modelos.

A maior diferença ocorrida entre os dois modelos foi 0,6 °C, próximo aos instantes em que o gradiente de temperatura é máximo (vide fig. IV.9), mostrando exatamente a influência da inclusão deste gradiente no comportamento do modelo.

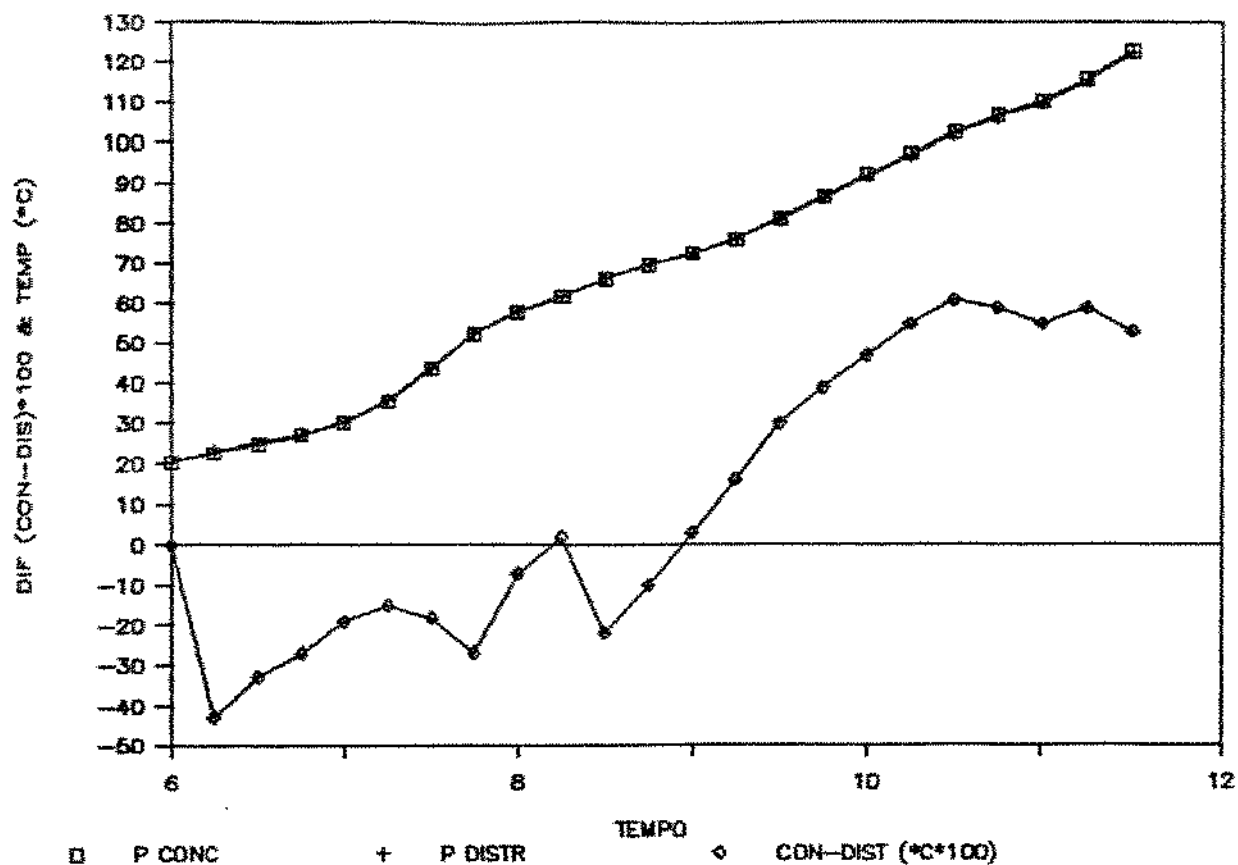


Fig. IV.11. Comparação da evolução da temperatura do coletor entre o modelo simplificado (parâmetros concentrados = CON) e o modelo adotado (parâmetros distribuídos com gradiente radial = DIST).

IV.5.2. - Modelagem do leito por parâmetros distribuídos incluindo o gradiente angular.

A análise seguinte tem caráter apenas qualitativo em função de três limitações principais:

a-incluiu somente a fase isostérica inicial devido à instabilidade do algoritmo construído na modelagem da mudança de fase do metanol.

b-os dados do ciclo 52 não incluem os gradiente angular de temperatura, impossibilitando uma boa comparação.

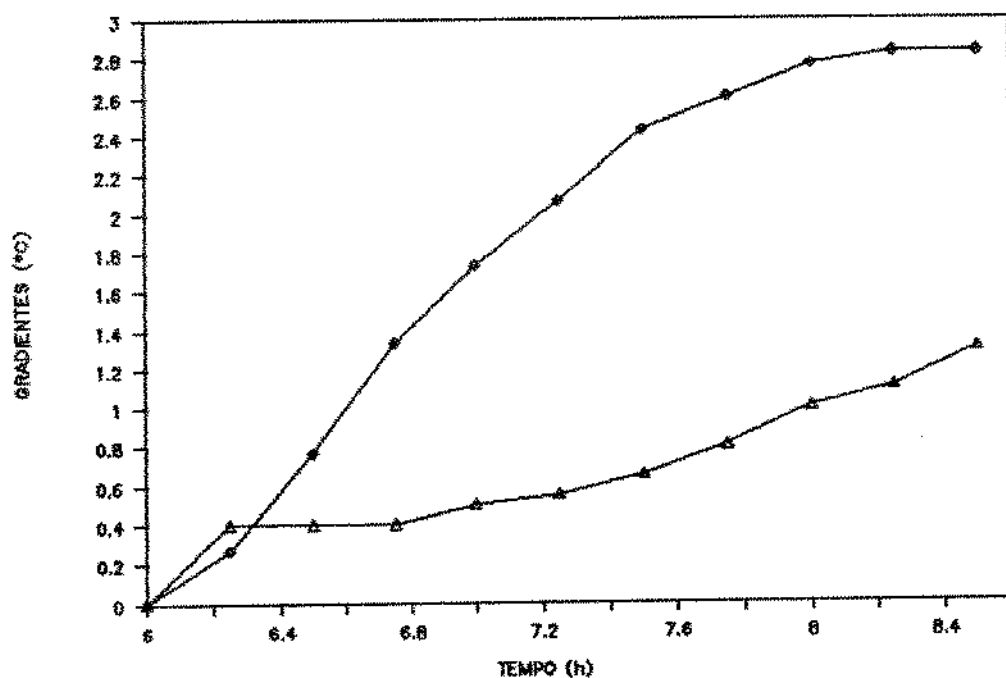
c-não se pode assumir que o fluxo de energia transmitida da cobertura para o leito por radiação é constante na direção θ , pois parte desta é difusa. Portanto, a quantificação desta parcela depende do gradiente angular obtido experimentalmente.

Nos dados apresentados por SILVEIRA Jr. (1990), o maior gradiente axial obtido foi da ordem de $1,5^{\circ}\text{C}$, atingidos no início da isóbara de aquecimento e com tendência a oscilar em torno deste valor, ao contrário do gradiente radial, que aumenta até próximo ao momento em que é atingida a temperatura máxima.

Uma vez que não se dispõe de informação quanto à inclinação dos pontos de medição em relação ao ângulo de incidência de energia solar, assume-se, por aproximação, que o maior gradiente angular ocorrido no ciclo 52 equivale ao maior gradiente axial externo do mesmo ciclo.

Ajustando então o modelo no sentido de aproximar os gradientes, obtém-se um fluxo de energia por radiação entre cobertura e leito composto por uma parcela constante que representa 50% do fluxo, mais uma parcela que varia em função do ângulo θ , cuja amplitude máxima representa também 50 do fluxo total.

Numericamente, esta hipótese incorporada à emissividade resulta em: $EIN = 0,45 \times (1 + \cos\theta)$.



Δ gradiente angular ◊ gradiente radial

Fig. IV.12. Evolução dos gradientes radial e angular para o modelo por parâmetros distribuídos com duas dimensões.

Considerando-se que as diferenças de temperatura entre a cobertura e o leito são pequenas, a contribuição esperada da radiação no fluxo total de energia também o é. Por este motivo, somado à falta de dados experimentais, decidiu-se não aprofundar esta linha de estudo.

Como comentário sobre o reflexo da complexidade do modelo no tempo de corrida do ciclo completo, observou-se para o processador 80286 os seguintes tempos:

Tab. IV.8. Tempos de execução de um ciclo completo para os modelos estudados.

MODELO	TEMPO (min)
parâmetros concentrados	5
gradiente radial	35
gradientes radial e angular (estimado)	210

O quanto detalhar um modelo é uma questão complexa, considerando-se oportuno comentar que EDGAR e HIMMELBLAU (1989), afirmam existir múltiplos critérios, e não um procedimento único para validação de um modelo, e que se deve obter a impressão de pessoas que conheçam o processo que está sendo modelado. LUYBEN (1974) coloca que, entre uma descrição rigorosa e uma solução suficientemente boa, é necessário um compromisso que ele denomina "optimum sloppiness".

Observando-se os tempos de corrida na tabela IV.7. e as conclusões tiradas de cada modelo, vê-se que o aumento do tempo de corrida é muito maior do que o ganho obtido em informação, apesar de não se conhecer um critério geral quantitativo para tal afirmação. A dificuldade na construção e depuração do modelo parece aumentar de maneira ainda mais drástica, pelo menos dentro da linha seguida na modelagem do leito - o método das diferenças finitas.

FINLAYSON (1980) comenta que o método implícito das diferenças finitas com direções alternantes, utilizado no modelo mais completo, (variante bidimensional) geralmente é o de execução mais rápida quando é estável para o sistema de equações utilizados. Contudo, sua utilização é limitada em termos de complexidade geométrica e física do sistema descrito.

Este pode ter sido o motivo do algoritmo não ter convergido para as fases isobáricas, e sugere a procura de um método diferente para o modelo em questão, como o dos elementos finitos, ou colocação ortogonal caso se deseje analisar o sistema mais detalhadamente.

V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

V.1. - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir que:

1. O modelo construído representa adequadamente os fenômenos básicos que determinam o desempenho do refrigerador solar, nos aspectos: lógica, simplificações, e comportamento.

Lógica: conforma se observa nas figuras IV.1. e IV.2., o modelo é estável e convergente, pois seu erro de discretização diminui com a redução do passo de tempo; e é consistente, porque seu comportamento se aproxima do sistema ideal de 1ª ordem com que foi comparado em simulação dinâmica.

Simplificações: são justificadas no item IV.1., com ênfase na limitação do fluxo de calor exclusivamente pela condutividade térmica do leito adsorativo, e não da região interna aos microporos (vide item II.4.1.).

Comportamento: a comparação entre simulação e ciclo real mostrou um erro da ordem de 3×10^{-3} para o COPTC, 2,2 % para a temperatura máxima do ciclo, e 4 % para a massa ciclada.

2. O modelo indica a influência dos coeficientes de troca de calor sobre seu desempenho, com a restrição de serem HCIN e EIN (HCIN = coeficiente de contato entre tubo e leito, e EIN = emissividade do coletor para o leito) estimativas não refinadas dos coeficientes reais do ciclo 52.

3. O modelo permite estimar a influência de parâmetros como a massa (item IV.3.2.) e o tipo de carvão ativo utilizado (item IV.3.1.), e alterações nas dimensões do refrigerador (item IV.3.1.).

4. A inclusão do gradiente radial permitiu uma estimativa dos coeficientes de troca de calor, como pode ser verificado na comparação com o modelo de parâmetros concentrados (item IV - 5.1.). Permitiu também uma avaliação preliminar da condutividade térmica do leito.

5. A sobreposição dos resultados obtidos nos estudos do aumento da massa e mudança do tipo de carvão indicam um potencial de aumento de massa dessorvida de 153 %. Esta é uma conclusão fundamental do ponto de vista da utilidade do modelo como ferramenta no projeto de novos protótipos, ou de melhorias nos existentes.

6. O nível de complexidade do modelo estudado é adequado aos dados experimentais existentes, como se verifica pela concordância do modelo com um ciclo real.

7. As trocas de energia no condensador e no evaporador têm influência sobre o desempenho do refrigerador, justificando que se sugira a realização de estudo específico analisando estes elementos detalhadamente.

V.2. - SUGESTÕES

Diante dos resultados obtidos, sugere-se como possíveis formas de continuidade deste trabalho:

1. A introdução de técnicas de otimização no estudo dos parâmetros do modelo atual.

2. A análise detalhada dos balanços de massa e energia em regime transiente do condensador e do evaporador. Este último se afigura como limitador da taxa de adsorção na fase final do ciclo em função de sua capacidade de troca de calor, afetando, deste modo, a viabilidade do uso do refrigerador na conservação de produtos que se degradam rapidamente.

3. A realização de experimentos onde os gradientes internos de temperatura no leito adsortivo em várias direções sejam quantificados, visando a confrontação de modelos mais completos, principalmente quando se desejar estudar o comportamento de leitos adsortivos com maior espessura.

VI - BIBLIOGRAFIA

BERING, B.P.; DUBININ, M.M.; SERPINSKY, V.V.; - Theory of volume filling for vapor adsorption. J. Colloid Interface Science, 21: 378 - 393, 1966.

BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. - Transport Phenomena. Wiley, 1960.

CARNAHAN, B.; LUTHER, H.R.; WILKES, S.D. - Applied Numerical Methods. Wiley, 1969.

CIOLA, R. - Fundamentos de Catálise. Ed. USP, 1981.

COUGANOWR, D.R.; KOPPEL, L.B. - Process Systems Analysis and Control. McGraw-Hill, 1965.

DUBININ, M.M.; ZAVERINA, E.D.; RADUSHKEVICH, L.V. - Zh. Fiz. Khim. 21 : 1351, 1947.

DUBININ, M.M.; - Adsorption in micropores. Journal of Colloid and Interface Science, 23 :487-499, 1967.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. - Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley, 1974.

EDGAR, T.F.; HIMMELBLAU, D.M. - Optimization of Chemical Processes. McGraw-Hill, 1989.

FINGER, G.S.; NAYLOR, T.H. - Verification of Computer Simulation Models. Manage. Sci. 14:92, 1967.

FINLAYSON, B.A. - Non Linear Analysis in Chemical Engineering. McGraw-Hill, 1980.

GRENIER, P.; PONS, M. - Experimental and theoretical results on the use of an activated carbon/methanol intermittent cycle for the application to a solar powered ice maker. Proceedings of The ISES Conferece, Perth, Pergamon Ed., 1983.

GUILLEMINOT, J.J.; MEUNIER, F. - Heat and Mass Transfer in a Non-Isothermal Fixed Bed Reactor. Intl. J. Heat Transfer 30 (8): pp 1595 - 1606, 1987.

HUBER, U.; STOECKLY, G.; HOURLET, J.P. - A generalization of the Dubinin - Radushkevich equation for the filling of heterogeneous micropore systems in strongly activated carbons. J. Colloid Interface Science, 67 (2) : 195-203, 1978.

KARAGIORGIAS, M; MEUNIER, F. - Etude de La Relaxation d'un Reacteur à Zeolithe Pendant La Desorption Eclair Provoquée par Un Échelon de Pression. Chem. Eng. J. 32, 171 -192, 1986.

KREITH, F. - Princípios da Transmissão de Calor. Edgar Blucher, 1973.

LUYBEN, W.L. - Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers. McGraw-Hill, 1974.

PASSOS, E.F.; MEUNIER, F.; GIANOLA, J.C. - Thermodynamic performance improvement of an intermittent solar - powered refrigeration cycle using adsorption of methanol on activated carbon. Heat Recovery Systems 6 (3) : 259 -264, 1986.

RADUSCHKEVICH, L.V. - Zh. Fiz. Khim., 23 : 1410, 1949.

RAND, B. - On the empirical nature of the Dubinin - Radushkevich of adsorption. J. Colloid Interface Science, 56 (2) : 337 - 346, 1976.

RIOS, J.A. - Contribution a l'étude d'un cycle de pompe a chaleur a adsorption a double effect utilisant le couple zeolite 13X - eau. Tese de doutoramento, Universidade Pierre et Marie Curie Paris IV, França, nov. 1984.

RUTHVEN, D.M. - Principles of Adsorption and Adsorption Processes. Wiley, 1984.

SILVEIRA Jr, V. - Montagem e teste de desempenho de um refrigerador solar por adsorção física com produção de gelo. Tese de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 1990.

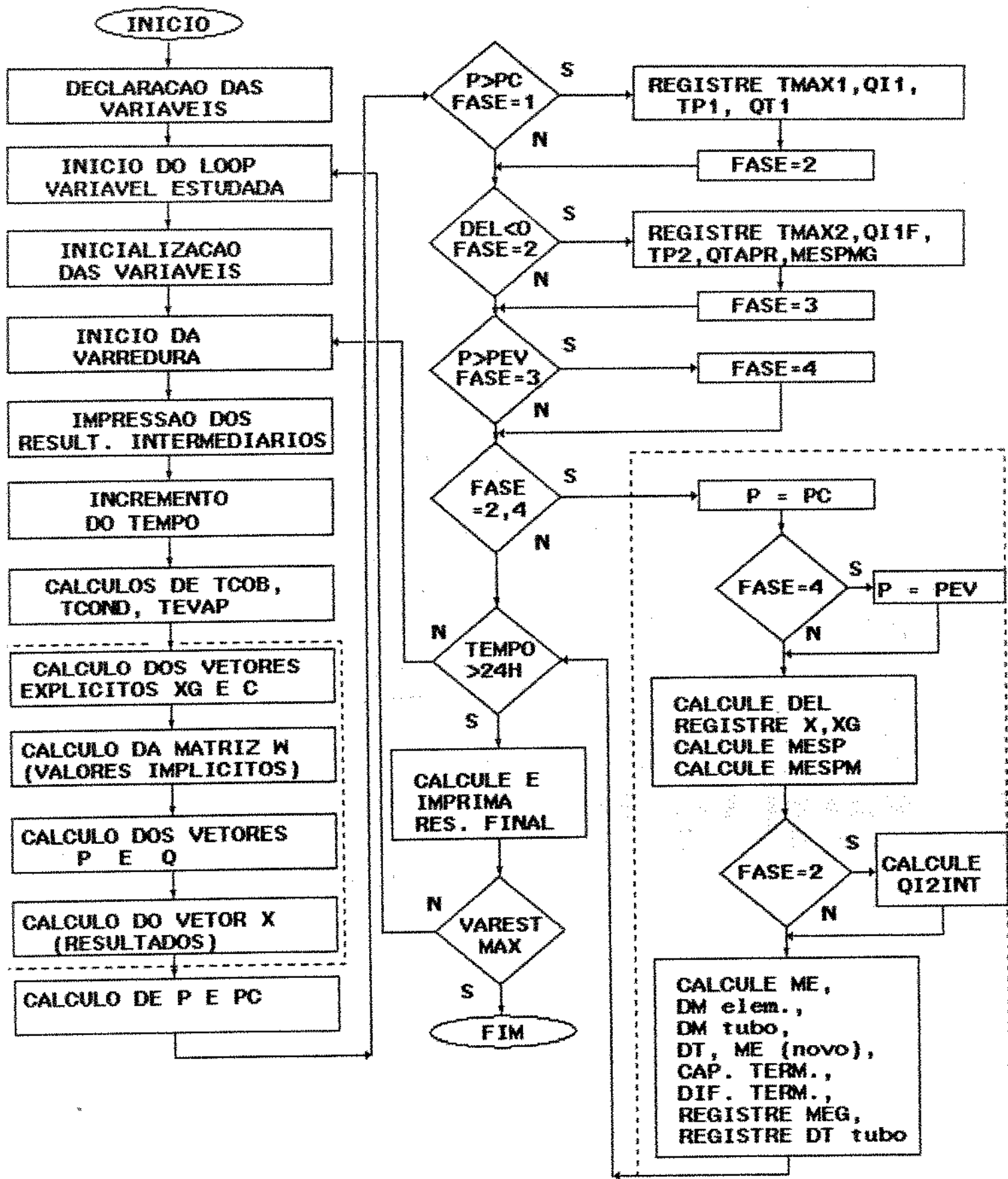
SUN, L.M.; MEUNIER, F. - A Detailed Model for Nonisothermal Sorption in Porous Adsorbents. Chem. Eng. Sci. v.42 n7 pp 1585 - 1593, 1987.

TAO, Y.B. - Using splines. Chem. Eng. october 26, 1987.

WEBER, T.W. - An Introduction to Process Dynamics and Control. Wiley, 1973.

VII - ANEXOS

VII.1. - Fluxograma do programa



VII.2. - Lista de variáveis do programa

Constantes:

São valores inicializados somente uma vez, na sua própria declaração, e que não podem ser mudados posteriormente durante a execução do programa.

pi=3.14159

sig=4.875E-08: (kJ/h/m².K⁴) constante de Stefan-Boltzmann.

l=dh/1.25: (kJ/kg) calor latente de vaporização do metanol.

cca=0.22: (kJ/kg.°C) calor específico do carvão ativo.

ccu=0.092: (kJ/kg.°C) calor específico do cobre.

cme=0.59: (kJ/kg.°C) calor específico do metanol.

lc=1.08: (m) largura do coletor, igual à soma dos diâmetros dos tubos de cobre.

mcao=10.55: (kg) massa de carvão ativo do protótipo.

mcuo=30.18: (kg) massa de cobre do protótipo.

mmeo=1.6: (kg) massa de metanol do protótipo.

nn=5: número de pontos nodais em que foi dividido o leito adsorativo.

tmin=17: (°C) temperatura ambiente mínima.

filename="db001.prn" nome dado ao arquivo listagem de resultados gerado durante a execução do programa.

Variáveis:

São valores que, depois de definidos durante a inicialização, podem ser alterados em diferentes situações posteriores durante a execução do programa mediante uma declaração de atribuição, como por exemplo: $a:=1$.

Variáveis de Números Inteiros

$a, b, d, e, i, j, m, v, z$: são variáveis para indexação de loops, variando a cada passagem de acordo com o elemento considerado.

$fase$: indica se o programa está executando a isóstera de aquecimento ($fase = 1$), a isóbara de dessorção ($fase = 2$), a isóstera de resfriamento ($fase = 3$), ou a isóbara de adsorção ($fase = 4$).

Variáveis de números reais escalares

$acond: (m^2)$	área de troca de calor do condensador.
$aevap: (m^2)$	área de troca de calor do evaporador.
arg :	argumento intermediário para cálculo de pressão.
$capt1: (kJ/^{\circ}C)$	capacidade térmica do coletor multitubular durante a isóstera de aquecimento.
$coptc$:	coeficiente de performance teórico do ciclo.
$copbs$:	coeficiente de performance bruto solar.

del:	(°C)	incremento de temperatura no ponto nodal externo durante um incremento de tempo.
dm:	(kg)	massa dessorvida total de metanol durante um passo de tempo.
dmi:	(kg)	massa dessorvida de metanol acumulada ao longo do tempo.
dn:		coeficiente da equação de Dubinin-Astakov.
dr:	(m)	distância entre dois pontos nodais quaisquer.
dtau:	(h)	incremento de tempo.
ep:		emissividade térmica.
hc:	(W/m ² .°C)	coef. de troca de calor por convecção.
hr:	(W/m ² .°C)	coef. de troca de calor por radiação.
k1,k2,k3,k4:		coeficientes do algoritmo Runge-Kutta.
kr:	(W/m.°C)	valor inicial da condutividade térmica.
mccol:	(kJ/°C)	capacidade térmica do coletor.
mca:	(kg)	massa de carvão ativo.
mccond:	(kJ/°C)	capacidade térmica do condensador.
mcevap:	(kJ/°C)	capacidade térmica do evaporador.
mcu:	(kg)	massa de cobre.
me:	(kg)	massa de metanol variável ao longo dos passos.
mme:	(kg)	massa inicial de metanol no coletor.
nexp:		coeficiente da equação Dubinin-Astakov.
nt:		número total de tubos no coletor.
p:	(mm Hg)	pressão no interior dos tubos do coletor.
pc:	(mm Hg)	pressão no interior do condensador.
pevap:	(mm Hg)	pressão no interior do evaporador.

pg:	(mmHg)	pressão no interior dos tubos do coletor no passo anterior.
pres:		chave para impressão de valores em intervalos de tempo regulares.
qc:		quociente entre calor recebido e capacidade térmica.
qi1:	(kJ)	totalizador da quantidade de calor utilizada para aquecer o coletor na fase 1.
qilf:	(kJ)	qi1 totalizado.
qi2int:	(kJ)	integrador da quantidade de calor utilizada para aquecer o coletor na fase 2.
qi2:	(kJ)	totalizador da quantidade de calor utilizada para aquecer o coletor na fase 2.
qt1:	(kJ)	totalizador do calor do sol na fase 1
captf:	(kJ)	variação da capacidade térmica do coletor na fase 1
qtde:	(kJ)	energia correspondente ao total de metanol dessorvido no ciclo.
qsolg:	(kJ)	calor do sol no passo anterior.
qtapr:	(kJ)	calor total do sol recebido durante a fase 2.
qtsol:	(kJ)	calor total do sol recebido pelo coletor.
r1:	(m)	raio externo do leite.
ra:	(kJ/h/m ² .K ⁴)	produto da constante de Boltzmann pela emissividade térmica.
rvol:		número de vezes que o volume escolhido do leite é maior do que o volume utilizado no protótipo.
slo:		inclinação da reta ln(p) vs. -1/T ² nas isósteras.

t:	(°C)	temperatura de cada elemento do leito adsorativo para o cálculo de teta.
tb:	(°C)	temperatura na interface externa do leito adsorativo.
tcex:	(h)	tempo característico do compartimento genérico para a interface com ambiente externo.
tcin:	(h)	tempo característico do compartimento genérico para a interface com o tubo.
tcob:	(°C)	temperatura da cobertura.
tcond:	(°C)	temperatura do condensador.
tevap:	(°C)	temperatura do evaporador.
tf:	(°C)	temperatura para o lado frio da interface genérica de troca de calor.
tg:	(°C)	temperatura no passo de tempo anterior, guardada para cálculos no passo seguinte.
tint:	(°C)	variável para armazenagem temporária de tb no cálculo da temperatura do evaporador.
tm:	(°C)	temperatura média do leito adsorativo.
tmg:	(°C)	temperatura média do leito adsorativo no passo anterior.
tmax1:	(°C)	temperatura máxima do coletor na fase 1.
tmax2:	(°C)	temperatura máxima do coletor na fase 2.
tp:	(min)	tempo.
tp1:	(min)	tempo final da fase 1.
tp2:	(min)	tempo final da fase 2.
tq:	(°C)	temperatura para o lado quente da interface genérica de troca de calor

tr:	(°C)	variável da função xrk.
tt:	(kg/kg)	(teta) fração da concentração máxima de metanol em carvão ativo.
ttg:	(kg/kg)	teta do passo anterior.
tti:	(kg/kg)	teta inicial.
ttm:	(kg/kg)	teta médio ao longo dos pontos nodais.
ttmg:	(kg/kg)	teta final da fase 2.
varest:	(?)	variável escolhida para série de corridas.
volu:	(m ³)	volume escolhido para o leito em função do número de tubos.
wo:	(kg/kg)	concentração máxima de metanol no carvão ativo.

Variáveis vetoriais

alfa:	(m ² /s)	difusividade térmica do leito adsortivo.
alfag:	(m ² /s)	difusividade térmica do leito adsortivo no passo anterior.
c:		vetor que contém a parte explícita do algoritmo de diferenças finitas.
dmv:	(kg)	variação da massa de metanol por adsorção ou dessorção em um elemento de volume genérico.
k:	(kJ/h.m. °C)	condutividade térmica do leito adsortivo.
lamb:		coeficiente do algoritmo de diferenças finitas.
mcav:	(kg)	massa de carvão ativo por elemento de volume.
meg:	(kg)	massa de metanol do passo anterior.
mmev:	(kg)	massa de metanol corrigida para cada elemento
pm:		vetor da solução da matriz tridiagonal.

q: vetor da solução da matriz tridiagonal.
r: (m) raio do leito adsorativo.
w: matriz tridiagonal.
aspi: matriz do esquema spiline.
bspi: matriz do esquema spiline.
cspi: matriz do esquema spiline.
dsp: matriz do esquema spiline.
yspi: matriz do esquema spiline.

VII.3. - Listagem do programa

VII.3. LISTAGEM DO PROGRAMA EM TURBO PASCAL

```

program fb92;
uses dos,crt,printer;

      (* revisao: 92.fev.17
      CALCULO DO PERFIL DE TEMPERATURA DO COLETOR SOLAR
      EM FUNCAO DO TEMPO E DA POSICAO RADIAL - CICLO COMPLETO *)

(* 1 declaracao *)
const
  sig=4.88E-08;  pi=3.14159;
  dh=359;        l=dh/1.25;    lh2o=79.8;
  tmin=20;       tceu=23;
  ccu=0.092;     cme=0.59;     cca=0.22;
  mcao=9.9;      mcuo=30.2;    mmeo=2;
  nn=8; (* cada elemento tem 0.002 m *)
  lc=1.0;
  FILENAME='caxxxx.prn';
  nspi=46;       hspi=30;
  TYPE coef = array[1..6,1..nspi+1] of real;
  TYPE vetor = array[1..nspi+1] of real;
  woo=0.2662; (* deion *)
  (* woo=0.425;    ac35  *)
  (* woo=0.860;    as    *)
var
  a,b,d,e,fase,i,j,m,v,z: integer;
  acond,aevap,arg: real;
  capt1,coptc,copbs: real;
  dr,dtau,dm,dmi,del,del2,dn: real;
  ev,ein: real;
  hr,hcin,hcex,hcobr: real;
  indcomp,indprint: real;
  kr: real;
  mccob,mccobr,mccond,mcevap,me,mme,mca,mcu: real;
  mesp,mespg,mespi,mespm,mespmg: real;
  nt,nexp: real;
  p,pc,pg,pevap: real;
  qc,qt1,qtdes,qi1,qilf,qi2,qi2int: real;

```

```

ra,r1,rvol:                                real;
slo:                                         real;
tb,tcex,tcin,tcobr,t,tg,tcob,tmax1,tmax2,
tp,tcond:                                  real;
tp1,tp2,tint:                              real;
volu:                                       real;
tm,tmg,tmgg:                              real;
delta,trk:                                 real;
tevap,k1,k2,k3,k4,nint:                   real;
varest:                                    real;
wo:                                         real;
p_l,p_n,t_l,t_a,q_s,m_d:                  real;
alfa,alfag,c,meg,pm,q,r:                  array[1..nn] of real;
dmv,dtv,k,lamb,mcav,mmev,
roc,vol,x,xg:                             array[1..nn] of real;
pxl,pxn,txa,txl,qxs,mxd:                  array[1..nspi+1] of real;
pspi,qspi,rspi,sspi:                      array[1..nspi+1] of real;
w:                                          array[1..nn,1..nn] of real;
tpspi:                                    vetor;
aspi,bspi,cspi,dspi,yspi:                 coef;
LISTAGEM:                                 TEXT;

```

(* 1.2 declaracao de funcoes *)

```

function tamb(t_a:real): real;
begin
    tamb:=t_a;
    (*
    if tp<=360 then
    begin
        tamb:=tmin+12*sin(2*pi*(tp)/1440);
    end
    else tamb:=32-14*sin(2*pi*(tp-360)/(3*1440));
    *)
end;

function ps(t:real): real;
begin

```

```

    ps:=exp(18.5875-(3626.55/(t+273.15-34.29)));
end;

```

```

function rome(t:real): real;
begin
    if (t+273.15)<=337.85 then
        begin
            rome:=(1283.31-3.3389*(t+273.15)+(8.65165e-3)*
sqr(t+273.15)-(10.1655e-6)*sqr(t+273.15)*(t+273.15))/1000;
        end
    else rome:=(854.2191-1.5672*t)/1000;
    end;
end;

```

```

function ab(tp:real): real;
begin
    ab:=0;
    if (tp<=780) then
        begin
            ab:=sqrt(sqrt(sin(2*pi*(tp)/1440)));
        end;
    end;
end;

```

```

function qsol(q_s:real): real;
begin
    if tp<720 then qsol:=q_s*ab(tp);
    if tp>=720 then qsol:=0;
    (*
    qsol:=850*(0.903*cos(2*pi*(tp-362)/1440)+0.0761);
    if tp>=730 then qsol:=0;
    *)
end;

```

```

function fd(tr,tout,tin:real):real;
begin
    fd:=- (dtau)*((tr-tout)/tcex+((tr-tin)/tcin)-qc);
end;

```

```

begin
  begin
    k1:=fd(tr,tout,tin);
    k2:=fd(tr,tout,tin+k1/2);
    k3:=fd(tr,tout,tin+k2/2);
    k4:=fd(tr,tout,tin+k3);
    tr:=tr+(k1+2*k2+2*k3+k4)/6;
    xrk:=tr;
  end;
end;
function tsky(t_a:real):real;
begin
  tsky:=0.0552*sqrt(t_a+273.15)*(t_a+273.15);
end;
function u(tq,tf,em,hc:real):real;
begin
  if(tq<>(tf)) then
    begin
      hr:=sig*em*(sqr(sqr(tq+273.15))-sqr(sqr(tf+273.15)))/
        (tq-tf);
      u:=hc+hr;
    end
  else u:=hc;
end;
(* aspi,bspi,cspi,dspi:coef;*)
function spi(i,j:integer;tp:real):real;
begin
  spi:=aspi[i,j]+
    bspi[i,j]*(tp-tpspi[j])+
    cspi[i,j]*sqr(tp-tpspi[j])+
    dspi[i,j]*(tp-tpspi[j])*sqr(tp-tpspi[j]);
end;

```

(* 2 inicializacao das variaveis *)

(*programa*)

begin

BEGIN

ASSIGN (LISTAGEM, FILENAME);

REWRITE (LISTAGEM);

(* valores do ciclo 52 a cada meia hora a partir de 6 h *)

pxl[1]:=34.1;	pxn[1]:=170.3;	txl[1]:=20.3;	txa[1]:=21.8;
pxl[2]:=43.1;	pxn[2]:=168.1;	txl[2]:=23.3;	txa[2]:=21.3;
pxl[3]:=62.3;	pxn[3]:=185.0;	txl[3]:=28.6;	txa[3]:=23.1;
pxl[4]:=124.4;	pxn[4]:=217.5;	txl[4]:=40.1;	txa[4]:=26.2;
pxl[5]:=285.5;	pxn[5]:=228.7;	txl[5]:=56.0;	txa[5]:=25.7;
pxl[6]:=293.2;	pxn[6]:=291.5;	txl[6]:=64.9;	txa[6]:=28.2;
pxl[7]:=306.7;	pxn[7]:=300.3;	txl[7]:=73.2;	txa[7]:=27.4;
pxl[8]:=299.8;	pxn[8]:=296.4;	txl[8]:=82.8;	txa[8]:=28.0;
pxl[9]:=305.0;	pxn[9]:=302.0;	txl[9]:=91.7;	txa[9]:=28.9;
pxl[10]:=315.0;	pxn[10]:=303.1;	txl[10]:=100.2;	txa[10]:=28.9;
pxl[11]:=307.2;	pxn[11]:=300.6;	txl[11]:=108.0;	txa[11]:=29.2;
pxl[12]:=348.7;	pxn[12]:=333.8;	txl[12]:=120.5;	txa[12]:=32.4;
pxl[13]:=239.6;	pxn[13]:=297.4;	txl[13]:=111.6;	txa[13]:=31.3;
pxl[14]:=214.9;	pxn[14]:=298.9;	txl[14]:=109.2;	txa[14]:=30.6;
pxl[15]:=173.9;	pxn[15]:=292.1;	txl[15]:=102.7;	txa[15]:=30.1;
pxl[16]:=103.9;	pxn[16]:=268.9;	txl[16]:=88.8;	txa[16]:=29.7;
pxl[17]:=84.7;	pxn[17]:=293.3;	txl[17]:=84.0;	txa[17]:=31.7;
pxl[18]:=123.4;	pxn[18]:=301.8;	txl[18]:=95.9;	txa[18]:=32.0;
pxl[19]:=96.3;	pxn[19]:=266.5;	txl[19]:=90.1;	txa[19]:=31.2;
pxl[20]:=82.7;	pxn[20]:=277.4;	txl[20]:=87.2;	txa[20]:=31.6;
pxl[21]:=47.9;	pxn[21]:=252.3;	txl[21]:=72.6;	txa[21]:=28.9;
pxl[22]:=32.8;	pxn[22]:=237.7;	txl[22]:=63.2;	txa[22]:=28.1;
pxl[23]:=32.2;	pxn[23]:=215.1;	txl[23]:=57.3;	txa[23]:=25.7;
pxl[24]:=27.0;	pxn[24]:=197.7;	txl[24]:=50.3;	txa[24]:=24.2;
pxl[25]:=23.8;	pxn[25]:=188.1;	txl[25]:=45.1;	txa[25]:=23.2;
pxl[26]:=22.7;	pxn[26]:=178.6;	txl[26]:=40.7;	txa[26]:=22.1;
pxl[27]:=22.2;	pxn[27]:=175.4;	txl[27]:=37.6;	txa[27]:=21.8;
pxl[28]:=23.0;	pxn[28]:=172.6;	txl[28]:=35.2;	txa[28]:=21.6;
pxl[29]:=23.7;	pxn[29]:=170.1;	txl[29]:=33.1;	txa[29]:=21.3;
pxl[30]:=24.3;	pxn[30]:=167.6;	txl[30]:=31.3;	txa[30]:=21.0;
pxl[31]:=25.1;	pxn[31]:=166.2;	txl[31]:=29.8;	txa[31]:=20.8;
pxl[32]:=26.1;	pxn[32]:=164.7;	txl[32]:=28.4;	txa[32]:=20.7;
pxl[33]:=26.8;	pxn[33]:=162.1;	txl[33]:=27.2;	txa[33]:=20.4;
pxl[34]:=27.6;	pxn[34]:=159.8;	txl[34]:=26.0;	txa[34]:=20.1;

pxl[36]:=29.8; pxn[36]:=158.6; txl[36]:=24.0; txa[36]:=20.0;
pxl[37]:=31.0; pxn[37]:=158.8; txl[37]:=23.3; txa[37]:=20.0;
pxl[38]:=32.1; pxn[38]:=158.2; txl[38]:=22.7; txa[38]:=19.9;
pxl[39]:=33.4; pxn[39]:=157.2; txl[39]:=22.1; txa[39]:=19.8;
pxl[40]:=34.2; pxn[40]:=156.4; txl[40]:=21.6; txa[40]:=19.7;
pxl[41]:=34.8; pxn[41]:=155.2; txl[41]:=21.1; txa[41]:=19.6;
pxl[42]:=35.4; pxn[42]:=153.9; txl[42]:=20.7; txa[42]:=19.5;
pxl[43]:=36.2; pxn[43]:=153.2; txl[43]:=20.3; txa[43]:=19.3;
pxl[44]:=36.7; pxn[44]:=152.8; txl[44]:=20.0; txa[44]:=19.3;
pxl[45]:=37.2; pxn[45]:=153.0; txl[45]:=19.8; txa[45]:=19.3;
pxl[46]:=37.6; pxn[46]:=153.2; txl[46]:=19.7; txa[46]:=19.3;
pxl[47]:=38.0; pxn[47]:=153.2; txl[47]:=19.7; txa[47]:=19.3;

qxs[1]:=117.4;	mxl[1]:=0;
qxs[2]:=144.5;	mxl[2]:=0;
qxs[3]:=226.3;	mxl[3]:=0;
qxs[4]:=472.3;	mxl[4]:=0;
qxs[5]:=571.4;	mxl[5]:=0;
qxs[6]:=647.6;	mxl[6]:=81.6;
qxs[7]:=694.9;	mxl[7]:=313.6;
qxs[8]:=877.3;	mxl[8]:=592.9;
qxs[9]:=926.6;	mxl[9]:=846.3;
qxs[10]:=991.6;	mxl[10]:=1078.4;
qxs[11]:=950.6;	mxl[11]:=1293.2;
qxs[12]:=1087.7;	mxl[12]:=1486.6;
qxs[13]:=413.2;	mxl[13]:=1598.3;
qxs[14]:=709.7;	mxl[14]:=1598.3;
qxs[15]:=634.7;	mxl[15]:=1598.3;
qxs[16]:=392.5;	mxl[16]:=1598.3;
qxs[17]:=409.2;	mxl[17]:=1598.3;
qxs[18]:=757.3;	mxl[18]:=1598.3;
qxs[19]:=515;	mxl[19]:=1598.3;
qxs[20]:=518;	mxl[20]:=1598.3;
qxs[21]:=223;	mxl[21]:=1598.3;
qxs[22]:=214;	mxl[22]:=1598.3;
qxs[23]:=64;	mxl[23]:=1598.3;
qxs[24]:=32;	mxl[24]:=1598.3;
qxs[25]:=4;	mxl[25]:=1598.3;
qxs[26]:=0;	mxl[26]:=1598.3;
qxs[27]:=0;	mxl[27]:=1598.3;

qxs[29]:=0;	mxd[29]:=1598.3;
qxs[30]:=0;	mxd[30]:=1598.3;
qxs[31]:=0;	mxd[31]:=1598.3;
qxs[32]:=0;	mxd[32]:=1598.3;
qxs[33]:=0;	mxd[33]:=1598.3;
qxs[34]:=0;	mxd[34]:=1598.3;
qxs[35]:=0;	mxd[35]:=1598.3;
qxs[36]:=0;	mxd[36]:=1598.3;
qxs[37]:=0;	mxd[37]:=1598.3;
qxs[38]:=0;	mxd[38]:=1598.3;
qxs[39]:=0;	mxd[39]:=1598.3;
qxs[40]:=0;	mxd[40]:=1598.3;
qxs[41]:=0;	mxd[41]:=1598.3;
qxs[42]:=0;	mxd[42]:=1598.3;
qxs[43]:=0;	mxd[43]:=1598.3;
qxs[44]:=0;	mxd[44]:=1598.3;
qxs[45]:=0;	mxd[45]:=1598.3;
qxs[46]:=0;	mxd[46]:=1598.3;
qxs[47]:=0;	mxd[47]:=1598.3;

(* calculo spline cubica *)

for j:=1 to nspi+1 do
begin

yspi[1,j]:=pxl[j];
yspi[2,j]:=pxn[j];
yspi[3,j]:=txl[j];
yspi[4,j]:=txa[j];
yspi[5,j]:=qxs[j];
yspi[6,j]:=mxd[j];
pspi[j]:=0;
tpspi[j]:=0;

end;

for i:=1 to 6 do

begin

qsapi[1]:=1; rsapi[1]:=0; ssapi[1]:=0;
qsapi[nspi+1]:=1; ssapi[nspi+1]:=0; csapi[i,nspi+1]:=0;
for j:=2 to nspi do
begin

qxs[29]:=0;	mxld[29]:=1598.3;
qxs[30]:=0;	mxld[30]:=1598.3;
qxs[31]:=0;	mxld[31]:=1598.3;
qxs[32]:=0;	mxld[32]:=1598.3;
qxs[33]:=0;	mxld[33]:=1598.3;
qxs[34]:=0;	mxld[34]:=1598.3;
qxs[35]:=0;	mxld[35]:=1598.3;
qxs[36]:=0;	mxld[36]:=1598.3;
qxs[37]:=0;	mxld[37]:=1598.3;
qxs[38]:=0;	mxld[38]:=1598.3;
qxs[39]:=0;	mxld[39]:=1598.3;
qxs[40]:=0;	mxld[40]:=1598.3;
qxs[41]:=0;	mxld[41]:=1598.3;
qxs[42]:=0;	mxld[42]:=1598.3;
qxs[43]:=0;	mxld[43]:=1598.3;
qxs[44]:=0;	mxld[44]:=1598.3;
qxs[45]:=0;	mxld[45]:=1598.3;
qxs[46]:=0;	mxld[46]:=1598.3;
qxs[47]:=0;	mxld[47]:=1598.3;

(* calculo spline cubica *)

for j:=1 to nspl+1 do
begin

yspl[1,j]:=pxl[j];
yspl[2,j]:=pxn[j];
yspl[3,j]:=txl[j];
yspl[4,j]:=txa[j];
yspl[5,j]:=qxs[j];
yspl[6,j]:=mxld[j];
pspl[j]:=0;
tpspl[j]:=0;

end;

for i:=1 to 6 do
begin

qspl[1]:=1; rspl[1]:=0; sspl[1]:=0;
qspl[nspl+1]:=1; sspl[nspl+1]:=0; cspl[i,nspl+1]:=0;
for j:=2 to nspl do
begin


```

sqr(hspi);
  qspi[j]:=2*2*hspi-hspi*rspi[j-1];
  rspi[j]:=hspi/qspi[j];
  sspi[j]:=(pspi[j]-hspi*sspi[j-1])/qspi[j];
end;
for j:=nsapi downto 1 do
begin
  aspi[i,j]:=yspi[i,j];
  csapi[i,j]:=sspi[j]-rspi[j]*csapi[i,j+1];
  bsapi[i,j]:=(yspi[i,j+1]-yspi[i,j])/hspi-hspi*
    (csapi[i,j+1]+2*csapi[i,j])/3;
  dsapi[i,j]:=(csapi[i,j+1]-csapi[i,j])/(3*hspi);
end;
end;

(*)
gotoxy(2,24); writeln('tcond qtsol slo      tempo
tm      p      pc      mespm   dmiE3 tamb  tevap fase');
gotoxy(5,23); writeln('coptc  copbs  mdess tp1      tp2
tmax1  tmax2  dm*1   varest fase  qilf qi2');
*)
gotoxy(2,24); writeln(' tp   t-tx                      p-px dT ');
gotoxy(36,24); writeln(' mespm   qx   qtsl tax   tcnd
tevp i f ');

```

```

      (*****
      (*  variavel. estudada:  inicio do loop  *)
      (*          dtau-nt-hc-ev-mca...          *)
(* iv *)      (*****
rvol:=1; nt:=20; dtau:=0.0625/32; ev:=0.84;

```

```

begin
ein:=0;          (* valor inicial da var estudada *)
while ein<=0 do
begin
varest:=ein;
nt:=20;
r1:=lc/(2*nt);
volu:=pi*(sqr(r1)-sqr(0.011));      rvol:=volu/0.0015833;
mme:=rvol*mmeo/nt; mca:=rvol*mcao/nt; mcu:=rvol*mcuo/nt;
wo:=woo;
acond:=22; aevap:=0.05;
coptc:=0; copbs:=0;
dmi:=0; del:=1; del2:=1; dm:=0; dr:=(r1-0.011)/(nn-1);
    dn:=1*(-9.698E-07); nexp:=2.0;  (* deion *)
    (* dn:=1*(-5.028E-07); nexp:=2.15;    ac35 *)
    (* dn:=1*(-2.578E-04); nexp:=1.32;    as *)
fase:=1;

hcin:=45; hcex:=5; hr:=0; hcobr:=20;
i:=1;
j:=1;
kr:=0.1;      (*vidro+cobre=2.16+2.77*)
me:=mme; mccob:=2.77; mccobr:=rvol*mcuo*ccu;

mccond:=2.5; mcevap:=0.2;

pc:=100; indprint:=60; indcomp:=0; pevap:=30.11;
p:=25.5;
qtsol:=0.00001; qtapr:=0; qtdes:=0;
qi1:=0; qi2:=0; qi2int:=0;
ra:=0;
slo:=0;
t_a:=txa[1];
tp:=0; t:=tamb(t_a);
arg:=(t+273.15)*abs(ln(ps(t)/p));
gotoxy(2,2); writeln(rome(t));
mespi:=wo*rome(t)*exp(dn*(exp(ln(arg)*nexp)));
tcex:=1; tcin:=1; tcobr:=tamb(t_a); tp1:=0;tp2:=0;
mesp:=mespi; tcob:=tamb(t_a);

```

```

tmax1:=0; tmax2:=0;
tcond:=tamb(t_a); tevap:=0; tint:=0;
tm:=tamb(t_a);
for a:=1 to nn do
begin
  r[a]:=0.011+dr*(a-1); k[a]:=kr; dmV[a]:=0; meg[a]:=mme;
end;

```

```

(* discretizacao do volume por ponto nodal *)
vol[1]:=pi*(sqr(r[1]+dr/2)-sqr(r[1]));
vol[nn]:=pi*(sqr(r[nn])-sqr(r[nn]-dr/2));
for b:=2 to nn-1 do
begin
  vol[b]:=pi*(sqr(r[b]+dr/2)-sqr(r[b]-dr/2));
end;
for a:=1 to nn do
begin
  mcav[a]:=mca*vol[a]/volu;  mmev[a]:=mme*vol[a]/volu;
  roc[a]:=(0.22*mcav[a]+0.59*mmev[a])/vol[a];
  alfa[a]:=k[a]/roc[a];
  lamb[a]:=alfa[a]*dtau/(dr*dr);  x[a]:=txl[1];xg[a]:=0;
end;
capt1:=(mcu*ccu+mca*cca+mme*cme)*nt;

```

```

(* 3  varredura das variaveis  *)
while tp<1380 do
begin
  if tp>330 then hcex:=6;
  if tp>720 then hcex:=4;
  tm:=0;
  for d:=1 to nn do
    (*varredura*)

```

```

    tm:=tm+x[d]*vol[d]/volu;
end;

p_1:=spi(1,j,tp);
p_n:=spi(2,j,tp);
t_1:=spi(3,j,tp);
t_a:=spi(4,j,tp);
q_s:=spi(5,j,tp);
m_d:=spi(6,j,tp);
gotoxy(2,2); writeln(tm:6:2,t_1:6:2,fase:3,tp/60+6:6:2);
if (indcomp>=30) and (j<47) then
begin
    j:=j+1; tpspi[j]:=tp;
    indcomp:=0;
end;
indcomp:=indcomp+dtau*60;
if indprint>=15 then
begin
    (*
gotoxy(1,25); writeln(tevap:7:3, tp/60+6:6:2, tm:8:2,
    p*1.333:8:2, x[nn]-x[1]:8:2, mespm:6:2,
    qtsol*4.186:6:0, (tamb(t_a)):5:1,
    tcond:5:1, fase:2);
    *)

    WRITELN(LISTAGEM,tp/60+6:6:2, tm:7:2,
    t_1:7:2, p*1.333:8:2,
p_1:8:2,qsol(q_s):8:2,mcao*mespm:6:2,
    (tamb(t_a)):5:1, tcond:5:1, fase:2);
    indprint:=0;
gotoxy(1,25); writeln( tp/60+6:5:2, tm-t_1:6:2,
    del:5:2,del2:5:2,
p*1.333-p_1:6:2, x[nn]-x[1]:4:1,
    mcao*mespm:6:2,
    q_s:7:2, qtsol*4.186:6:0, tamb(t_a):7:2,
    .tcond:7:1, tevap:6:2, fase:3);
end;

qtsol:=qtsol+qsol(tp)*dtau;

```

```

tp:=tp+(dtau*60);
indprint:=indprint+dtau*60;
pg:=p; tmgg:=tmg; tmg:=tm;

```

```

(* 3.1 equacoes diferenciais de 1a ordem *)

```

```

(* cobertura *)

```

```

(*ed*) qc:=qsol(q_s)/mccob;
tcex:=mccob/u(tcob,tsky(t_a),0.2,hcex);
tcin:=mccob/(u(tcob,tb,ein,hcin)*pi);
tcob:=xrk(tcob,tamb(t_a),tb);

```

```

(* evaporador *)

```

```

if fase=4 then
begin
    qc:=dm*1*nt/mcevap;
    tcex:=10e10;
    tcin:=mcevap/(u(tevap,0,0,0.5)*aevap);
    tevap:=xrk(tevap,0,0);
end;

```

```

(* condens *)

```

```

qc:=(acond*400/30+dm*1*nt)/mccond;
tcex:=mccond/(u(tcond,tsky(t_a),0.95,45)*acond/22);
tcin:=10e6;
tcond:=xrk(tcond,tamb(t_a),tamb(t_a));

```

```

(* 3.2 esquema df: declaracao termos explicitos *)

```

```

for a:=1 to nn do

```

```

begin

```

```

    xg[a]:=x[a];    lamb[a]:=alfa[a]*dtau/(dr*dr);

```

```

end;

```

```

c[1]:=x[1]*(1/lamb[1]);

```

```

c[nn]:=x[nn]*(1/lamb[nn])+

```

```

(dr/k[nn])*(dr/r[nn]+2)*(u(tcob,tb,ein,hcin)*tcob);

```

```

for i:=2 to nn-1 do
begin
  c[i]:=x[i]*(1/lamb[i]);
end;
w[1,1]:=(1/lamb[1]+2);      w[1,2]:=-2;
for m:=2 to nn-1 do
begin
  w[m,m]:=2+1/lamb[m];      w[m,m-1]:=-(1-dr/(2*r[m]));
  w[m,m+1]:=-(1+dr/(2*r[m]));
end;
w[nn,nn-1]:=-2;
w[nn,nn]:=1/lamb[nn]+2+
dr*(u(tcob,tb,ein,hcin)/k[nn])*(dr/r[nn]+2);
(* resolucao da matriz tridiagonal *)
pm[1]:=w[1,2]/w[1,1]; q[1]:=c[1]/w[1,1];
for v:=2 to nn do
begin
  if v<> nn then
  begin
    pm[v]:=w[v,v+1]/(w[v,v]-w[v,v-1]*pm[v-1]);
  end;
  q[v]:=(c[v]-w[v,v-1]*q[v-1])/
    (w[v,v]-w[v,v-1]*pm[v-1]);
end;
x[nn]:=q[nn];
for z:=nn-1 downto 1 do
  x[z]:=q[z]-pm[z]*x[z+1];
tb:=x[nn];

```

(* 3.3 entrada nas isobaras e calculo da massa evaporada *)

```

tm:=0;
for d:=1 to nn do
begin
  tm:=tm+x[d]*vol[d]/volu;
end;
t:=tm;
pc:=exp(18.5875-3626.55/(tcond+273.15-34.29));
if odd (fase) then

```

```

    arg:=(ln(mespm/(wo*rome(tm)))/dn);
    p:=ps(tm)*exp((-1/(tm+273.15))*
        (exp(ln(arg)*(1/nexp))));
end;
if (p>pc) and (fase=1) then
begin
    fase:=2;
    tmax1:=tm;
    qil:=capt1*(tmax1-tmin);
    tp1:=tp;
    qt1:=qtsol;
end;
if (del<0) and (del2<0) and (fase=2) then
begin
    fase:=3;
    qtapr:=qtsol;
    mespmg:=mespm;
    qilf:=qil;
    tmax2:=tm;
    tp2:=tp
end;
pevap:=exp(18.5875-3626.55/(tevap+273.15-34.29));
if (p<=pevap) and (fase=3) then fase:=4;
if odd (fase+1) then
begin
    (*calcula teta*)
    if fase=2 then
    p:=pc;
    if fase=4 then
    p:=exp(18.5875-3626.55/(tevap+273.15-34.29));
    mespm:=0;    dm:=0;
    for a:=1 to nn do
    begin
        del:=tm-tmg;
        del2:=tmg-tmgg;
        t:=x[a];
        tg:=xg[a];
        arg:=(tg+273.15)*abs(ln(ps(tg)/pg));
        mespg:=wo*rome(tg)*exp(dn*(exp(ln(arg)*nexp)));
        if mespg>mespi then mespg:=mespi;
        arg:=(t+273.15)*abs(ln(ps(t)/p));
    end;
end;

```

```

    if mesp>mespi then mesp:=mespi;
    mespm:=mespm+mesp*vol[a]/volu;
    if fase=2 then
    begin
        qi2int:=qi2int+(mca*(mespg-mesp)*cme*
            (vol[a]/volu))*(t-tg);
    end;
    me:=meg[a]*mesp/mespg;
    dm[a]:=(meg[a]-me)*vol[a]/volu;
    dm:=dm+dm[a];
    dtv[a]:=t-tg;
    mmev[a]:=me*vol[a]/volu;
    if dtv[a]=0 then
    begin
        dtv[a]:=1; dm[a]:=0;
    end;
    roc[a]:=(0.22*mcav[a]+0.59*mmev[a]+
        dm[a]*dh/dtv[a])/vol[a];
    alfag[a]:=alfa[a];
    alfa[a]:=k[a]/roc[a];
    meg[a]:=me;
    end;
    alfa[nn]:=k[nn]/roc[nn];
    dmi:=dmi+dm;
    end;
    pg:=p;
    end;
    (*calcula teta*)
    (*varredura*)

```

(* 3.4 calculo dos COP's *)

```

qtde:=1*(mespi-mespmg)*mca*nt;
qi2:=capt1*(tmax2-tmax1)-qi2int+qtde*1.25;
coptc:=qtde/(qi1f+qi2);
copbs:=qtde/qtsol;

gotoxy(2,25); writeln(coptc:7:5,copbs:8:5,qtde/1:8:5,
    tp1/60+6:5:2,tp2/60+6:6:2,tmax1:6:1,
    tmax2:6:1,qtde:6:1,varest:8:4,qtapr:8:1);

```



```
qtdes/1:8:5,tp1/60+6:5:2, tp2/60+6:6:2,  
tmax1:6:1,tmax2:6:1,qtdes:7:1,varest:9:4,  
qtapr:8:1);
```

```
(*****)  
(* variavel estudada: final do loop *)  
(*      dtau-nt-hc-ev-mca...      *)  
(*****)
```

```
    ein:=ein+0.1;  
end;  
    ev:=ev+0.1;  
    writeln(' ');  
end;  
CLOSE (LISTAGEM);  
WRITELN(' PRONTO ');  
END;  
readln;  
end.                                     (*programa*)
```

VARIANTE BIDIMENSIONAL

Listagem do esquema de diferenças finitas

Nota: as demais partes do programa são essencialmente iguais ao modelo radial.

```
(* 3 esquema df *)
  for a:=1 to ni do
    begin
      for b:=1 to nj do
        begin
          meg[a,b]:=mme;
          dmV[a,b]:=0;
        end;
      end;
    for b:=1 to nj do
      begin
        te[b]:=3.14159/(nj-1)*(b-1);
      end;
      gotoxy(25,15);writeln(x[1,1]:5:1);
      gotoxy(30,15);writeln(x[1,4]:5:1);
      gotoxy(35,15);writeln(x[1,7]:5:1);
      gotoxy(40,15);writeln(x[7,1]:5:1);
      gotoxy(45,15);writeln(x[7,4]:5:1);
      gotoxy(50,15);writeln(x[7,7]:5:1);
      lambr:=lamb[1,1];
      (* 3.1 varr. var's, começando c/ r(=i) p/ cada valor de teta(=j) *)
      for j:=1 to nj do
        begin
          (* 3.1.1 decl. termos explicitos e cc. 1o 1/2 passo *)
          if j<>1 then if j<>nj then
            begin
              c[1]:=x[1,j-1]/(kte2*sqr(r[1]))+x[1,j]*(2/lamb[1,j]-2/(kte2*sqr(r
```

```

        x[1,j+1]/(kte2*sqr(r[1]));
c[ni]:=x[ni,j-1]/(kte2*sqr(r[ni]))+x[ni,j]*(2/lamb[ni,j]-
        2/(kte2*sqr(r[ni]))) + x[ni,j+1]/(kte2*sqr(r[ni])) +
(* h(tcob.*)
(dr/k[ni,j])*(dr/r[ni]+2)*(h(tcob,x[nn,j],sig*0.2+sig*0.2*insol(t
e[j]),45)*tcob);
        for i:=2 to ni-1 do
            begin
c[i]:=x[i,j-1]/(kte2*sqr(r[i]))+x[i,j]*(2/lamb[i,j]-2/(kte2*sqr(r
[i]))))+
                x[i,j+1]/(kte2*sqr(r[i]));
            end;
        end;
        if j=1 then
            begin
c[1]:=x[1,1]*(2/lamb[1,1]-2/(kte2*sqr(r[1]))) + 2*x[1,2]*(1/(kte2*s
qr(r[1])));
                c[ni]:=x[ni,1]*(2/lamb[ni,1]-2/(kte2*sqr(r[ni]))) +
x[ni,2]*(2/(kte2*sqr(r[ni]))) + (dr/k[ni,1])*(dr/r[ni]+2)*(h(tcob,x
[nn,j],sig*0.2+sig*0.2*insol(te[j]),45)*tcob);
                for i:=2 to ni-1 do
                    begin
c[i]:=2*x[i,2]/(kte2*sqr(r[i]))+x[i,1]*(2/lamb[i,j]-2/(kte2*sqr(r
[i]))))
                    end;
                end;
                if j=nj then
                    begin
c[1]:=x[1,nj]*(2/lamb[1,nj]-2/(kte2*sqr(r[1]))) + 2*x[1,nj-1]*(1/(k
te2*sqr(r[1])));
                        c[ni]:=x[ni,nj]*(2/lamb[ni,nj]-2/(kte2*sqr(r[ni]))) +
x[ni,nj-1]*(2/(kte2*sqr(r[ni]))) + (dr/k[ni,nj-1])*(dr/r[ni]+2)*(h(
tcob,x[nn,j],sig*0.2+sig*0.2*insol(te[j]),45)*tcob);
                        for i:=2 to ni-1 do
                            begin
c[i]:=2*x[i,nj-1]/(kte2*sqr(r[i]))+x[i,nj]*(2/lamb[i,nj]-2/(kte2*
sqr(r[i])))
                            end;

```

```
(* 3.1.2 decl. matriz tridiagonal 1o 1/2 passo *)
w[1,1]:=(2/lamb[1,1]+2);      w[1,2]:=-2;
for m:=2 to ni-1 do
begin
  w[m,m]:=2+2/lamb[m,j];      w[m,m-1]:=-(1-dr/(2*r[m]));
  w[m,m+1]:=-(1+dr/(2*r[m]));
end;
w[ni,ni-1]:=-2;
w[ni,ni]:=2/lamb[ni,j]+2+dr*(h(tcob,x[nn,j],sig*0,45)/k[ni,j])*(d
r/r[ni]+2);
```

```
(* 3.1.3 resol. matriz tridiagonal 1o 1/2 passo *)
pm[1]:=w[1,2]/w[1,1]; q[1]:=c[1]/w[1,1];
for v:=2 to ni do
begin
  if v<> ni then
  begin
    pm[v]:=w[v,v+1]/(w[v,v]-w[v,v-1]*pm[v-1]);
  end;
  q[v]:=(c[v]-w[v,v-1]*q[v-1])/(w[v,v]-w[v,v-1]*pm[v-1]);
end;
x[ni,j]:=q[ni];
for z:=ni-1 downto 1 do
  x[z,j]:=q[z]-pm[z]*x[z+1,j];
end;
```

```
(* 3.1.4 incremento tempo *)
tp:=tp+dtau*60/2; pres:=pres+dtau*60/2;
```

```
(* 3.2 decl.termos explicitos e cc. 2o 1/2 passo*)
for i:=1 to ni do
```

```
(* 3.2.2 decl. geral de c e matriz tridiag. 2o 1/2 passo *)
begin
  for j:=1 to nj do
  begin
    if i<>1 then if i<>ni then
    begin
      c[j]:=x[i-1,j]*(1-dr/(2*r[i]))+x[i,j]*(2/lamb[i,j]-2)+
```

```

    end
end;
w[1,1]:=(2/lamb[1,1]+2/(kte2*sqr(r[1])));
w[1,2]:=-2/(kte2*sqr(r[1]));
for m:=2 to nj-1 do
begin
    w[m,m]:=2/lamb[i,m]+2/(kte2*sqr(r[m]));
    w[m,m-1]:=-1/(kte2*sqr(r[m]));
    w[m,m+1]:=-1/(kte2*sqr(r[m]));
end;
w[nj,nj-1]:=-2/(kte2*sqr(r[ni]));
w[nj,nj]:=(2/lamb[ni,nj]+2/(kte2*sqr(r[ni])));
if i=1 then
begin
    for j:=1 to nj do
    begin
        c[j]:=x[1,j]*(2/lamb[1,j]-2)+2*x[2,j];
    end;
end;
if i=ni then
begin
    for j:=1 to nj do
    begin
c[j]:=2*x[ni-1,j]+x[ni,j]*(2/lamb[ni,j]-2-(h(tcob,x[nn,j],sig*0.2
,45)/k[ni,j])*dr*(dr/r[ni]+2))+
((dr/k[ni,j])*(dr/r[ni]+2)*(h(tcob,x[nn,j],sig*0.2+sig*0.2*insol(
te[j]),45)*tcob));
    end;
end;

(* 3.2.3 resol matriz tridiagonal 2o 1/2 passo *)
pm[1]:=w[1,2]/w[1,1]; q[1]:=c[1]/w[1,1];
for v:=2 to nj do
begin
    if v<> nj then
    begin
        pm[v]:=w[v,v+1]/(w[v,v]-w[v,v-1]*pm[v-1]);
    end;
    q[v]:=(c[v]-w[v,v-1]*q[v-1])/(w[v,v]-w[v,v-1]*pm[v-1]);

```

```
x[i,nj]:=q[nj];  
for z:=nj-1 downto 1 do  
  x[i,z]:=q[z]-pm[z]*x[i,z+1];  
end;
```

FINAL DO ANEXO VII.3.