

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo e Simulação de um Ciclo de
Absorção Intermitente com Regene-
ração Solar---

Alfredo Lütke - Engenheiro
Isaias de Carvalho Macedo - Orientador

Trabalho apresentado para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Mecâni-
ca, pela Comissão de Pós-Graduação da
Faculdade de Engenharia de Campinas

- CAMPINAS -

1977

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

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

Ao Prof. *ISAIAS DE CARVALHO MACEDO*, pela valiosa orientação deste trabalho.

Aos técnicos do *Grupo de Energia Solar*, que colaboraram na fase de construção e montagem do equipamento.

À *RENATA*, pelo constante incentivo.

R E S U M O

É projetado e construído um equipamento de absorção intermitente para produzir gelo com regeneração solar. A mistura usada é água-amônia.

Suas características dinâmicas de funcionamento são levantadas, coeficientes de performance são determinados, e é feita uma avaliação da importância das condições de condensação sobre este parâmetro de desempenho.

Tendo como finalidade o uso em anteprojetos, é proposto um modelo numérico simples para simulação do funcionamento do ciclo. Os resultados fornecidos pela simulação são comparados com os obtidos experimentalmente, sendo discutidas as implicações de algumas hipóteses da formulação usada.

ÍNDICE

	pág.
1. Introdução	1
2. Objetivos	3
3. Análise teórica do ciclo	4
4. Parte Experimental	6
4.1 - Equipamento e Instrumentação	6
4.2 - Procedimentos e Resultados.	7
5. Simulação do ciclo	11
5.1 - Formulação do Modelo	11
5.2 - Resultados e comparações.	17
6. Conclusões e comentários	19
7. Tabelas e Gráficos	20-33
8. Lista de Símbolos	34
9. Referências	36
10. Apêndice	38

1. INTRODUÇÃO

Considerando-se que a própria radiação solar é de natureza intermitente, parece atraente a idéia de utilizá-la para acionar ciclos também intermitentes.

Um equipamento de absorção deste tipo funciona basicamente da seguinte forma: um gerador-absorvedor (A, na Fig. 1) contém a solução de absorvente e refrigerante que é aquecida durante o dia e gera vapor de refrigerante; este se condensa no condensador-evaporador (B) seguindo o caminho 1. Durante a noite o resfriamento da solução em A faz com que o refrigerante seja absorvido de volta. Para que isto aconteça ele se evapora em B produzindo um efeito de refrigeração; é seguido então o caminho 2.

Uma possível aplicação deste ciclo intermitente de absorção seria para a produção de gelo em certas vilas de pescadores. Como o gelo é produzido durante a noite, já de manhã cedo e antes de os barcos saírem, ele estará disponível no equipamento, podendo ser embarcado para conservação do pescado. Durante o dia que se inicia, será então processada a regeneração solar do refrigerante.

Equipamentos deste tipo já foram objeto de alguns estudos, tendo o ciclo teórico sido analisado por *Williams et al* [1,2] e *Chinnappa* [3,4]. Alguns procedimentos de cálculo são sugeridos, mas como o ciclo funciona constantemente em regime transitório não existe atualmente nenhum procedimento rigoroso para projeto e otimização.

Chinnappa [3], usando um coletor plano e solução água-amônia obteve coeficientes de performance (COP) entre 5 e 6%. O condensador e o absorvedor eram refrigerados a água, e não foi produzido gelo a partir de água líquida.

Prata [5], usando dois coletores planos de 1,5 m² cada um, e também água-amônia, produziu aproximadamente 5 kg de gelo por dia.

Um sistema um pouco diferente, em que foi usado um concentrado parabólico de 1,5 m² para aquecer a solução de água-amônia, foi investigado por *Trombe e Foex* [6].

O equipamento foi projetado para ter pequena inércia térmica e quantidades de 6 kg de gelo por dia são citadas.

Swartman *et al* [7] comparou soluções de tiocianato de sódio-amônia e água-amônia. Para o primeiro caso foram obtidos COPs entre 11 e 27%, e para o segundo entre 5 e 14%. O coletor era plano com 1,50 m², sendo produzidos aproximadamente 5 kg de gelo por dia.

Algumas outras combinações absorvente-refrigerante foram testadas, tais como cloreto de cálcio-amônia [8], nitrato de lítio-amônia [4], tetra etileno glicol dimetil-Freon 21 e brometo de lítio-água. Nestes trabalhos entretanto não foi usada regeneração solar.

2. OBJETIVOS

Este trabalho consiste na parte inicial de um programa desenvolvido dentro do convênio de Conversão de Energia Solar FINEP-UNICAMP (IF-102). O programa prevê o desenvolvimento e a análise do desempenho de sistemas de refrigeração usando absorção, em ciclos intermitentes, com regeneração solar. Os objetivos deste trabalho foram:

1. Projeto e construção de uma máquina usando a mistura água-amônia.
2. Testes preliminares do funcionamento, levantando os coeficientes de performance e as características das fases de regeneração e absorção.
3. Desenvolvimento de um modelo simples que pudesse simular a dinâmica dos processos nas duas fases. O objetivo da simulação é essencialmente prever a influência de diversas variáveis de projeto (portanto controláveis) e ambientais (incontroláveis) no desempenho do ciclo.

3. ANÁLISE TEÓRICA DO CICLO

Habitualmente, dois ciclos teóricos são propostos [4]: absorção a pressão constante e absorção a temperatura constante.

No caso do equipamento utilizado neste trabalho, a absorção não se processou nem a pressão, e nem a temperatura constante. Assim, para efeito de comparação entre as várias configurações e condições de operação foram considerados apenas os valores dos coeficientes de performance do ciclo.

Este coeficiente é definido como a razão entre o resfriamento efetivo durante a absorção e a energia incidente durante o período de geração.

$$\text{COP} = \frac{Q_r}{Q_R} \quad (1)$$

Imediatamente antes de começar o período de absorção existe amônia à temperatura ambiente no evaporador (B, na Fig. 1), e solução pobre, a uma pressão menor, no absorvedor (A). Abrindo-se a válvula de absorção (caminho 2, Fig. 1) haverá uma rápida queda de pressão e temperatura em B. Para que ocorra este resfriamento da amônia no evaporador uma certa quantidade será evaporada sem produzir resfriamento útil. Assim, o refrigerante restante será o responsável pelo resfriamento efetivo que é calculado por:

$$Q_r = m'_b \cdot \overline{(h'' - u')} \quad (2)$$

onde $\overline{(h'' - u')}$ é o calor latente de vaporização médio durante o período de absorção.

Para se obter o valor de m'_b é feito um balanço de energia do evaporador (Fig. 2), obtendo-se então:

$$(m' + dm')(u' + du') - m'.u' + (-dm')h'' = 0$$

Donde:

$$m'.du' + dm'.u' - dm'.h'' = 0$$

$$m'.dm' = (h'' - u') dm'$$

$$\frac{dm'}{m'} = \frac{du'}{(h'' - u')}$$

O valor de $(h'' - u')$ varia pouco entre os estados a e b , antes e após a abertura da válvula respectivamente, de forma que será considerado constante e igual a $(h'' - u')_a$. Integrando então entre os estados a e b obtemos:

$$m'_b = m'_a \cdot \exp \left[\frac{m'_b - u'_a}{(h'' - u')_a} \right] \quad (3.a)$$

A energia incidente total Q_R é obtida por integração gráfica da curva medida de insolação.

A massa de amônia m'_a é também um valor medido.

4. PARTE EXPERIMENTAL

4.1. Equipamento e Instrumentação

O gerador-absorvedor consiste num coletor plano ligado a dois reservatórios (Fig. 3). O horizontal não fica completamente cheio de solução, de forma que o nível pode variar durante o funcionamento.

O coletor é formado por 9 tubos paralelos de aço de 5/8" OD, ligados horizontalmente por dois "headers" de 1" OD.

Este sistema foi unido a uma chapa de cobre de 0,5 mm de espessura, 1,53 m de comprimento por 1,20 de largura, e colocado dentro de uma caixa isolada termicamente com uma cobertura de dois vidros de 4 mm de espessura, montados numa armação removível.

O coletor recebeu uma inclinação de 30° e ficou voltado para a direção norte. A Fig. 4 mostra o coletor com a cobertura de vidros. Sua área é de $1,84 \text{ m}^2$.

O condensador é um tubo aletado, refrigerado a ar por convecção natural e colocado à sombra (*no alto, Figs. 5 e 6*).

A amônia condensada é recolhida num reservatório que consiste em duas garrafas com um volume total de aproximadamente 8 l, às quais foi conectado um indicador de nível de vidro (Fig. 6) que permitia leituras de volume com um desvio de $\pm 0,02 \text{ l}$. Para o valor médio de leitura de 1,50 l o coeficiente de variação é menor que 1,4%.

Medidas de temperatura foram feitas com termopares de cobre-constantan, localizados nos pontos numerados de 1 a 4 (Fig. 3). A temperatura de referência foi tomada em banho de gelo.

Para estas leituras foi utilizado um milivoltímetro digital Keithley modelo 163, com precisão indicada no catálogo de $\pm (0,1\% \text{ da leitura} + 1 \text{ dígito})$. Como a escala usada foi em centésimo de milivolt, para o valor médio de leitura de 2,50 mV isto corresponde a uma medida de $(2,50 \pm 0,01) \text{ mV}$, equivalente a $(64 \pm 0,3)^{\circ}\text{C}$. O coeficiente de variação é portanto menor que 0,5%.

Os termopares não foram calibrados individualmente, mas com um quinto elemento foram feitas medidas de temperatura do ar ambiente, comparadas então com as leituras de um termômetro de mercúrio com desvio de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Medidas de pressão foram feitas com um manômetro de amônia Terbrasma de 5", sendo as leituras feitas na escala de temperatura de condensação de amônia, com desvio de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Para a faixa de pressões medidas isto corresponde a $\pm 0,013$ atm, e para o valor médio de leitura de 15°C o coeficiente de variação é 2%.

Para medir a radiação solar incidente foi usado um radiômetro *Eppley* modelo 8-48, colocado no plano do coletor e ligado a um registrador *Leeds Northrup* modelo *Speedomax Recorder* com velocidade de $1,0"/\text{hr}$ e escala de $2 \text{ cal}/\text{cm}^2.\text{min}.\text{pol}$.

4.2. Procedimentos e Resultados

A solução foi preparada dentro do próprio equipamento. Após ser completamente evacuado, 9,0 kg de água destilada foram introduzidos no coletor através da válvula VD (Fig. 3). Em seguida foram acrescentados 9,0 kg de amônia, que borbulhava na água contida no reservatório inclinado, formando a solução. Em todos os testes a concentração foi portanto 50%.

Durante o período diurno as válvulas VB e VC ficavam fechadas e VA ficava aberta. O aquecimento da solução e formação de bolhas no coletor provocava uma circulação natural de sentido anti-horário entre o coletor e os reservatórios. Durante certo tempo havia aquecimento e aumento de pressão, sem condensação (Fig. 7). Em certo instante esta começava, prosseguindo por algumas horas até que o nível de amônia no evaporador parava de subir e/ou mesmo começava a descer. Fechava-se então a válvula VA e a cobertura de vidro era retirada.

Um período de geração típico, medido no dia 27-8-76 é mostrado na Fig. 7.

Uma vez retirados os vidros, começava o resfriamento da

solução, notando-se uma rápida estratificação térmica da mesma. A solução contida no reservatório superior (horizontal) não se resfriava bem, pois o mesmo é isolado com uma camada de fibra de vidro.

Após algumas horas de resfriamento, porém, tinha-se pressão alta no evaporador e baixa no coletor e reservatórios, de forma que ao ser aberta a válvula VB ocorria intensa ebulição da amônia e rápida queda de pressão e temperatura no evaporador. O vapor assim gerado borbulhava no reservatório inclinado, sendo absorvido pela solução pobre e provocando uma circulação em sentido anti-horário (fig. 3). O resfriamento da solução se processava no coletor.

Esta etapa de absorção e borbulhamento prosseguia até a absorção total da amônia gerada pela solução.

Um período de absorção típico, medido na noite de 11-11-76 para 12-11 é mostrado na Fig. 8. Notar que durante este período não era possível medir a quantidade instantânea de amônia no evaporador, devido à ebulição e formação de gelo em volta do indicador de nível.

Não foram produzidos quantidades apreciáveis de gelo a partir de água contida em um recipiente, devido às deficientes características de troca de calor e isolamento térmico do evaporador.

A válvula VC se destinava a drenar água que eventualmente passasse para o evaporador. Segundo Chinnappa [3], se a temperatura na entrada do condensador for menor que 50°C a retificação do vapor será completa. Neste trabalho porém, apesar de se observarem temperaturas neste ponto de até 67°C , não houve passagem sensível de água para o condensador.

Assim, o uso da válvula VC foi somente para drenar de volta ao coletor a solução de água-amônia que em alguns casos, por descuido de operação, passou para o evaporador. Isto aconteceu quando o período de aquecimento diurno foi iniciado com a válvula VB aberta e VA fechada.

As medidas do período de geração foram feitas em cinco dias não consecutivos, e um resumo dos principais resultados é mostrado na TABELA I.

No último teste, dia 23-11, foi experimentado uma modificação no equipamento: aumento do coeficiente global de troca de calor do condensador.

Para isto foi adaptado sobre o mesmo um pequeno reservatório com vários furos pequenos, de onde gotejava água que mantinha as aletas do condensador constantemente úmidas.

O objetivo era avaliar a importância deste parâmetro sobre o desempenho do ciclo. Nota-se (TABELA I, última coluna) que a pressão de condensação se manteve mais baixa e o aumento do COP foi considerável.

Os dias 24-8, 27-8 e 1-9-76 apresentaram-se com algumas nuvens e o dia 25-8-76 foi totalmente claro. É significativo observar que o dia 23-11-76 também esteve parcialmente nublado.

A temperatura ambiente variou pouco nestes dias.

O balanço energético para os dias 27-8 e 01-09-76, baseado em dados medidos e em algumas aproximações, é mostrado na TABELA II. A energia incidente Q_R é obtida a partir da curva de insolação. O calor útil absorvido pela solução Q_u , responsável pelo aumento de energia interna da solução e vaporização da amônia, é calculado pela expressão:

$$Q_u = m_p u_p - m_o u_o + (m_o - m_p) \overline{h''} \quad (4)$$

Q_c , o calor devido à capacidade térmica do gerador, é estimado com métodos citados na literatura [3,9], sendo portanto um valor aproximado.

E considerando que:

$$Q_R = Q_u + Q_c + Q_{LT} \quad (5)$$

determina-se Q_{LT} , soma de todas as perdas: energia refletida, calor perdido através dos vidros e isolamento, e calor rejeitado no

retificador. É também um valor aproximado.

A Fig. 11 mostra um diagrama detalhado dos fluxos de ca
lor no gerador.

5. SIMULAÇÃO DO CICLO

5.1. Formulação do Modelo

Como o ciclo está constantemente em regime transitório, foi elaborado um modelo matemático do sistema para simular o seu funcionamento em computador digital, e permitir avaliar a influência de algumas variáveis em sua dinâmica.

Para que os sistemas de equações que surgem na formulação do modelo pudessem ser resolvidos, foi admitido que a solução evolui por uma sucessão de estados de equilíbrio. As implicações desta hipótese fundamental serão discutidas posteriormente.

Dois programas foram feitos: um para o período diurno (GER) e outro para o período noturno (ABS).

~~As propriedades da solução água-amônia foram introduzi-~~das no computador sob a forma de tabelas, e para solução das equações de estado foi usada uma subrotina de interpolação em funções de duas variáveis.

Programa GER

Para efeito de cálculo o período de geração foi dividido em duas etapas:

a) Aumento de pressão, sem condensação:

A concentração praticamente não varia, pois a quantidade de amônia que sai da solução contribui apenas para o aumento de pressão, e é desprezível. Assim, a concentração é considerada constante e as equações são:

Equação de estado da solução:

$$u_2 = u(\xi_0, t_2) \quad (6.a)$$

Balanco de energia da chapa do coletor e circuito da

solução [9] entre os instantes 1 e 2, forma integral e aproximada:

$$\left[q_{R \cdot \tau \cdot \alpha} - U_L \left(\frac{t_2 + t_1}{2} - t_A \right) (i_2 - i_1) \right] A \cdot f =$$

$$= C(t_2 - t_1) + m_o(u_2 - u_1) \quad (7)$$

A energia incidente é obtida por integração numérica da curva de insolação:

$$q_{R \cdot \tau \cdot \alpha} = \int_{i_1}^{i_2} q_R di \quad (8)$$

Assim, conhecidas as condições em 1 e fixando-se o instante 2, através de i_2 , têm-se as incógnitas t_2 , u_2 e $q_{R \cdot \tau \cdot \alpha}$, calculadas pelo sistema formado pelas equações (6.a), (7) e (8).

b) Condensação

Inicialmente foi experimentada uma formulação que incluía o balanço energético do condensador e considerava conhecido o seu coeficiente global de troca de calor.

A concentração de equilíbrio porém, é muito sensível às variações de temperatura e pressão e surgiram na resolução numérica alguns problemas de divergência que não puderam ser controlados.

Como na prática a pressão de condensação varia pouco, optou-se então por fixar este parâmetro em um valor tal que a diferença entre a temperatura de condensação e a temperatura mé

dia ambiente fosse constante.

Desta forma as equações são:

Equações de estado da solução:

$$t_2 = t(\xi_2, p_c) \quad (9.a)$$

$$u_2 = u(\xi_2, t_2) \quad (6.b)$$

Balanço de energia da chapa do coletor e circuito da solução, desprezando o calor rejeitado no retificador, forma integral e aproximada:

$$\left[q_{R \text{ } 1-2} \cdot \tau \cdot \alpha - U_L \left(\frac{t_2 + t_1}{2} - t_A \right) (i_2 - i_1) \right] A \cdot f =$$

$$= C(t_2 - t_1) + (m_1 - \Delta m)u_2 - m_1 \cdot u_1 + \Delta m \left(\frac{h_1'' + h_2''}{2} \right) \quad (10)$$

Admitindo que a retificação é completa, temos o seguinte balanço de massa de amônia:

$$\Delta m = \left(\frac{\xi_1 - \xi_2}{1 - \xi_2} \right) m_1 \quad (11.a)$$

Equação de estado do vapor de amônia:

$$h_2'' = h''(p_c, t_2) \quad (12)$$

Desta forma, conhecidas as condições no instante, 1, e fixando-se i_2 , determinam-se as incógnitas u_2 , t_2 , ξ_2 , $q_{R, 1-2}$, h_2'' e

Δm , resolvendo o sistema formado pelas equações (6.b), (8), (9.a), (10), (11.a) e (12).

Programa ABS

Também foi dividido em duas etapas, para facilidade de cálculo:

a) Resfriamento da água

Inicialmente é calculada a queda de pressão no evaporador após a abertura da válvula de absorção. A experiência mostrou que esta fase é muito rápida (menos de 5 minutos) e por isso considera-se que não há troca de calor no evaporador e nem no absorvedor.

As equações são:

Balanco de energia do evaporador, forma integral e aproximada:

$$m_b' = m_a' \exp \left[\frac{2(u_b' - u_a')}{(h_a'' + h_b'' - u_a'' - u_b')} \right] \quad (3.b)$$

Balanco de massa de amônia:

$$m_b - m_a = \left(\frac{\xi_b - \xi_a}{1 - \xi_b} \right) m_a \quad (11.b)$$

Balanco de energia do absorvedor:

$$c(t_b - t_a) + m_b u_b - m_a u_a = (m_b - m_a) \left(\frac{h_a'' + h_b''}{2} \right) \quad (13)$$

Balanço total de massa:

$$m_a' + m_a = m_b' + m_b \quad (14)$$

Equações de estado da solução:

$$u_b = u(\xi_b, t_b) \quad (6.c)$$

$$t_b = t(\xi_b, p_b) \quad (9.b)$$

Equação de estado da amônia no evaporador:

$$u_b' = u'(p_b) \quad (15)$$

Equação de estado do vapor saturado:

$$h_b'' = h_s''(p_b) \quad (16)$$

Temos portanto 8 incógnitas u_b , ξ_b , t_b , p_b , m_b , u_b' , m_b' e h_b'' ; e 8 equações: (3.b), (6.c), (9.b), (11.b), (13), (14), (15) e (16).

Uma vez calculado este estado b, ele é tomado como início de um resfriamento uniforme da água desde a temperatura ambiente até 0°C.

São usadas as equações (6.c), (9.b), (11.b), (14),

(15) e (16), substituindo-se os índices a e b respectivamente por 1 e 2.

E mais:

Balanco de energia do evaporador, desprezando sua inércia térmica e a troca de calor com o ar ambiente:

$$\begin{aligned} \frac{U_E}{2} (t_{AG1} + t_{AG2} - t_1' - t_2') (i_2 - i_1) = \\ = m_2' u_2' - m_1' u_1' + (m_1' - m_2') \left(\frac{h_1'' + h_2''}{2} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

Balanco de energia da água a ser congelada:

$$\begin{aligned} \frac{U_E}{2} (t_1' + t_2' - t_{AG1} - t_{AG2}) (i_2 - i_1) = \\ = m_A \cdot c (t_{AG2} - t_{AG1}) \end{aligned} \quad (18)$$

Balanco de energia do absorvedor:

$$\begin{aligned} \frac{U_A \cdot A}{2} (2t_A - t_1 - t_2) (i_2 - i_1) + (m_2 - m_1) \left(\frac{h_1'' - h_2''}{2} \right) = \\ = C(t_2 - t_1) + m_2 u_2 - m_1 u_1 \end{aligned} \quad (19)$$

Equação de estado da amônia em ebulição:

$$t_2' = t'(p_2) \quad (20)$$

Fixando-se valores de t_{AG2} , as incógnitas serão:

$$t_2, u_2, p_2, \xi_2, m_2, u_2', t_2', m_2', h_2'' \text{ e } i_2.$$

b) Formação do gelo

As equações e incógnitas são as mesmas do período de resfriamento da água, substituindo-se porém t_{AG} por m_G e a equação (18) por:

$$U_A(t_1' + t_2')(i_2 - i_1) = 2(m_{G2} - m_{G1})h_{fus} \quad (21)$$

5.2. Resultados e Comparação

Um resultado típico da simulação do período diurno é mostrado na Fig. 9. As condições de insolação e temperatura ambiente usadas foram as mesmas do dia 27-8, de forma que pode ser feita uma comparação com as curvas medidas. A curva de temperatura experimental registrada é a média entre as temperaturas de entrada e saída do coletor. Nota-se que as temperaturas previstas na simulação são sempre menores que os valores medidos, mas as curvas de pressão e massa de amônia destilada se aproximam bem. Estas características foram observadas também para os demais dias simulados e a diferença entre massa final de amônia medida e prevista foi sempre menor que 12%.

O valor usado para o coeficiente de perdas do gerador U_L foi em todos os casos 6,2 Kcal/hr.m².°C, estimado a partir dos balanços energéticos finais dos períodos de geração (TABELA II). Notar que embora não esteja rigorosamente correta, esta é uma forma aproximada de se introduzir o calor de retificação (APÊNDICE A).

A diferença da temperatura no condensador foi determinada de forma que em todos os casos a pressão de condensação simulada fosse uma boa aproximação da pressão medida. Assim, o valor usado foi sempre 6°C , com exceção do dia 23-11, em que o condensador estava molhado e para o qual usou-se 3°C .

Quanto à hipótese de equilíbrio, usada na formulação do modelo, pode ser testada com os resultados experimentais. Nas TABELAS III e IV estão registradas as temperaturas, pressões e concentrações instantâneas para os dias 27-8 e 01-9 respectivamente. A leitura de pressão é dada pela temperatura de condensação de amônia correspondente (t_c). A concentração é calculada a partir da massa de amônia destilada. Tendo-se estes dois parâmetros pode ser determinada a temperatura de equilíbrio da solução (t_{eq}). Nota-se que em alguns casos este valor se situa entre as temperaturas de entrada e saída do coletor t_{in} e t_{out} respectivamente, mas quase sempre está aproximadamente $7-8^{\circ}\text{C}$ abaixo da temperatura real da solução.

No que diz respeito à previsão das curvas de pressão e massa de amônia destilada, porém, esta condição de não equilíbrio parece não afetar seriamente os resultados da simulação.

Uma simulação do período noturno é mostrada na Fig. 10. As condições iniciais e de temperatura ambiente são as mesmas da noite de 11-11 + 12-11. Notar que o modelo que simula o período noturno é bastante simplificado, pois considera apenas troca de calor da amônia com a água a ser congelada. Na realidade, devido ao deficiente isolamento do evaporador, a principal troca de calor ocorre com o ar ambiente.

Mesmo assim o modelo é útil, pois permite avaliar as quantidades de gelo máximas que poderiam ser produzidas. E com pequenas modificações, como a introdução dos termos referentes à troca de calor com o ar ambiente e capacidade térmica do evaporador, pode fornecer resultados mais próximos da realidade.

Um resultado importante da simulação noturna, ainda na fase de projeto de equipamento, foi prever a necessidade de se retirar a cobertura de vidro do coletor durante a noite. A simulação indicava que se isto não fosse feito a absorção só se completaria na tarde do dia seguinte, e este fato foi experimentalmente confirmado.

6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Os objetivos definidos inicialmente foram atingidos com o projeto e construção da máquina de absorção intermitente. Os testes preliminares foram realizados demonstrando que as eficiências (coletor e ciclo) são pelo menos tão boas quanto as de alguns casos relatados na literatura, restando grande margem para melhorias na variação da concentração inicial e no sistema de resfriamento do condensador.

Foi demonstrado que um modelo simples pode prever claramente a influência de algumas variáveis na dinâmica e desempenho do ciclo, fornecendo resultados qualitativamente corretos e quantitativamente úteis nas previsões de modificações de projeto.

A continuação do trabalho segue uma linha bem clara, onde serão exploradas as possibilidades de aumento do COP através de melhorias nas condições de condensação e aumento da concentração de amônia (inicialmente até 55%). O único limite neste último caso é a capacidade de absorção noturna.

Todas as eventuais modificações manterão a idéia básica de um ciclo autônomo, utilizando somente a energia solar.

TABELA I - PERÍODO DE GERAÇÃO: Resumo dos Resultados

DATA	24-8	25-8	27-8	1-9	23-11
Início	9:00	8:30	9:00	7:50	9:00
Duração	6h 30min	7h 20min	6h 10min	6h 40min	6h 30min
Q_R [Kcal]	7520	9810	7600	7070	8180
m' Máxima [Kg]	1,23	2,01	1,41	1,19	1,95
Pressão Máxima [ata]	16,3	16,7	14,9	13,9	13,2
$\bar{t}_{out}$ Máxima [°C]	96,0	103,0	92,0	89,0	-
COP [%]	4,4	5,5	5,0	4,6	6,5
$\bar{t}_A$ [°C]	30	29	30	31	29

TABELA II - BALANÇO ENERGÉTICO DOS DIAS 27-8 E 01-9

	27-8-76		01-9-76	
	Kcal	%	Kcal	%
Q_R	7600	100	7070	100
Q_u	1620	21	1610	23
Q_c	720	10	730	10
Q_{LT}	5260	69	4730	67

TABELA III - VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DE NÃO EQUILÍBRIO PARA O
DIA 27-8

HORA	t_c [°C]	t_{in} [°C]	t_{out} [°C]	m' [Kg]	ξ $\left[\frac{\text{kg NH}_3}{\text{kg solução}} \right]$	t_{eq} [°C]
8:00	-11,0	23,0	27,0	0,0	0,50	22
8:45	2,4	36,5	44,0	0,0	0,50	37
9:30	14,5	53,0	59,0	0,0	0,50	53
10:30	30,0	72,5	77,0	0,0	0,50	-
12:00	37,5	90,5	92,0	0,92	0,474	82
13:00	35,0	89,5	91,0	1,26	0,462	82
14:30	31,5	80,0	85,5	1,41	0,457	78

TABELA IV - VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DE NÃO EQUILÍBRIO PARA O
DIA 01-9

HORA	t_c [°C]	t_{in} [°C]	t_{out} [°C]	m [Kg]	ξ $\left[\frac{\text{Kg NH}_3}{\text{Kg solução}} \right]$	t_{eq} [°C]
7:50	-17,0	16,0	19,5	0,0	0,50	17
9:30	5,0	42,0	47,0	0,0	0,50	38
11:00	28,0	70,0	74,0	0,0	0,50	67
12:15	33,0	87,5	89,0	0,62	0,482	77
13:00	35,0	88,0	88,0	0,95	0,472	80
14:30	31,7	83,0	85,0	1,19	0,464	78

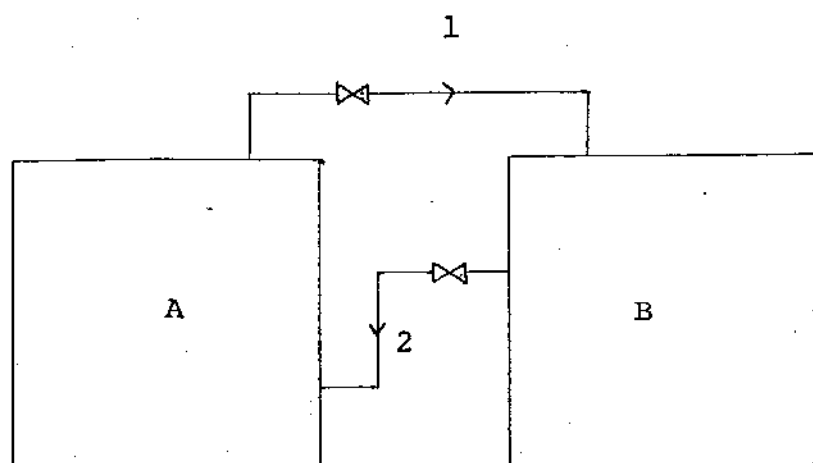


FIG. 1 - Esquema de um equipamento de absorção intermitente

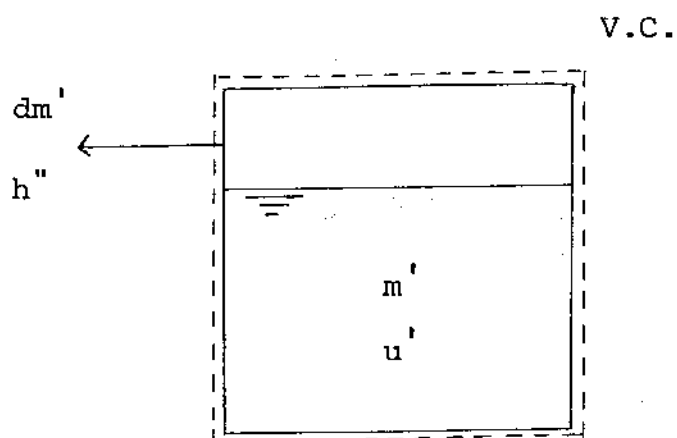


FIG. 2 - Balanço de energia do evaporador

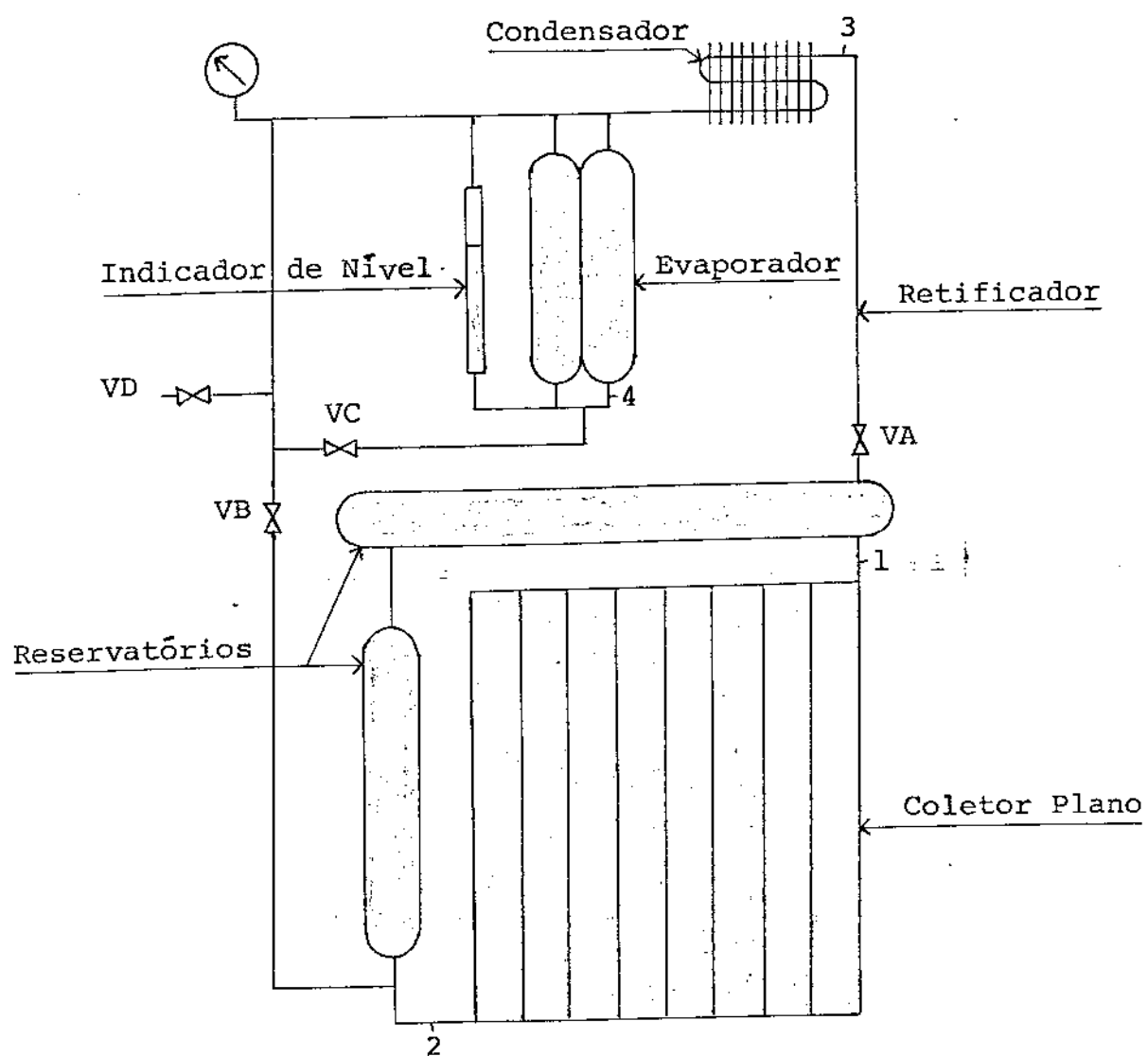


FIG.3 - Esquema do equipamento construído e usado nos testes

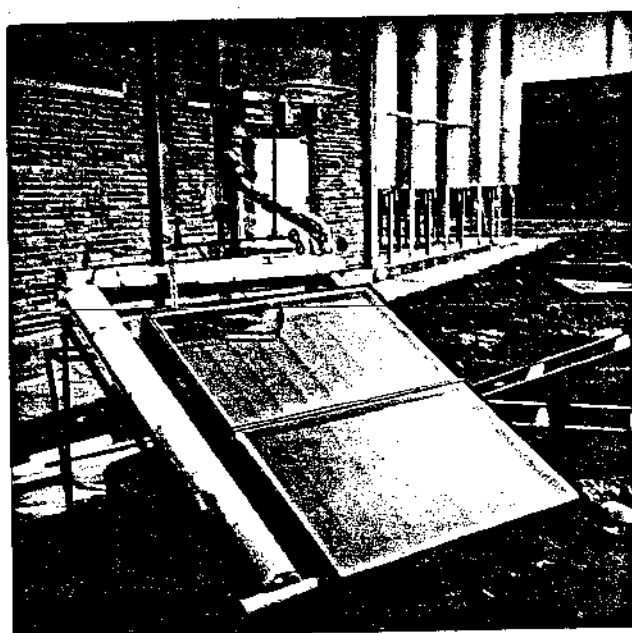


FIG. 4 - Vista geral do
equipamento

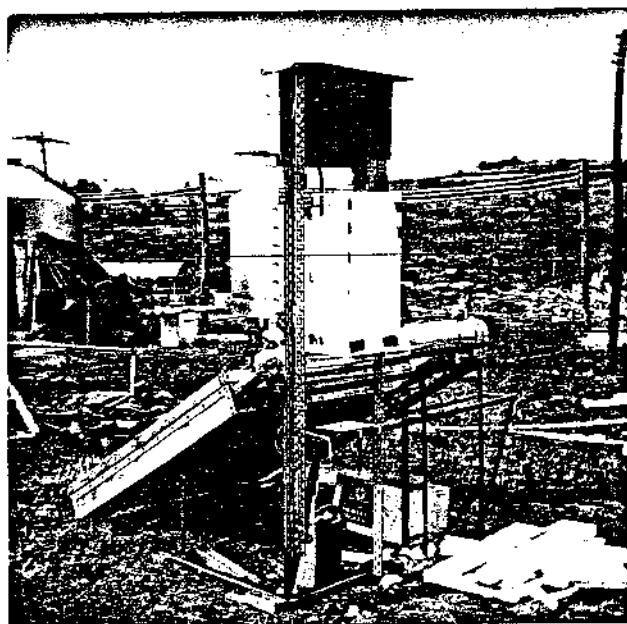


FIG. 5 - Vista do conden-
sador e caixa do
evaporador

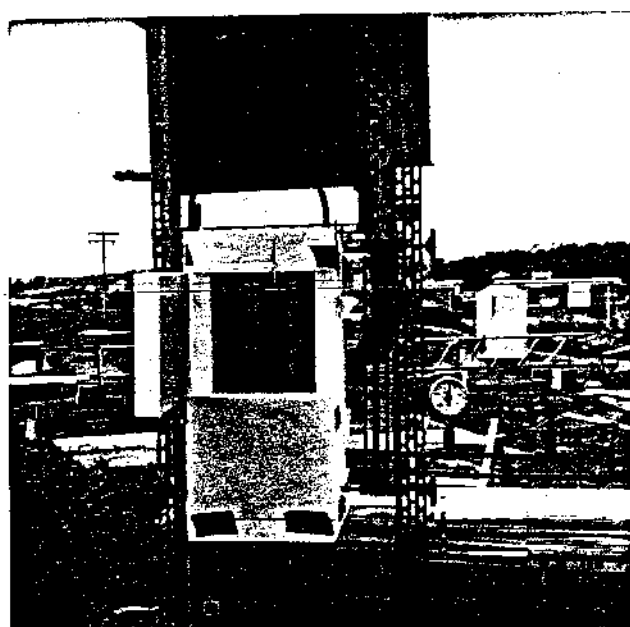


FIG. 6 - Detalhe do eva-
porador e indi-
cador de nível

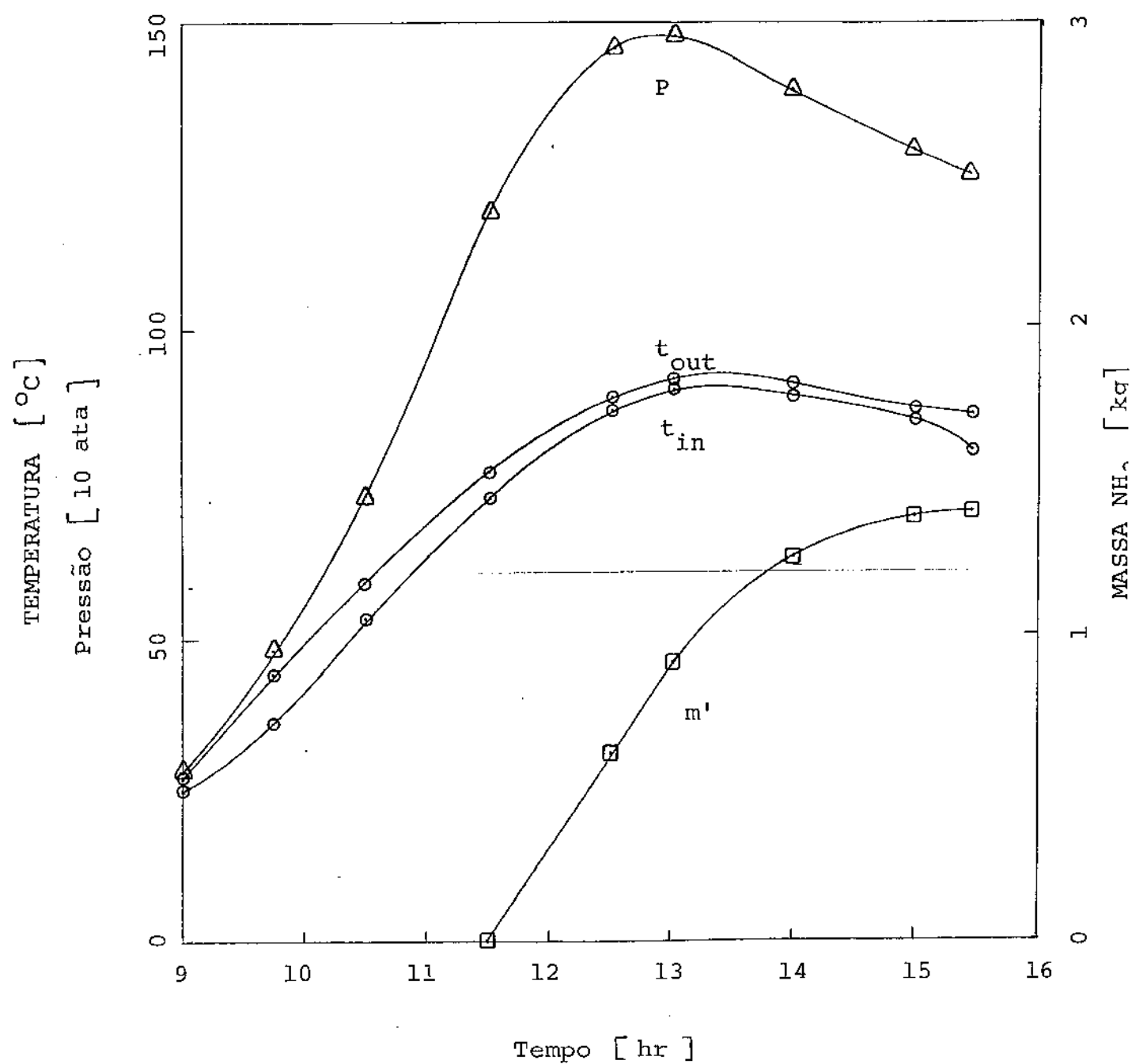


FIG. 7 - Variação de alguns parâmetros durante o período de geração do dia 27-8.

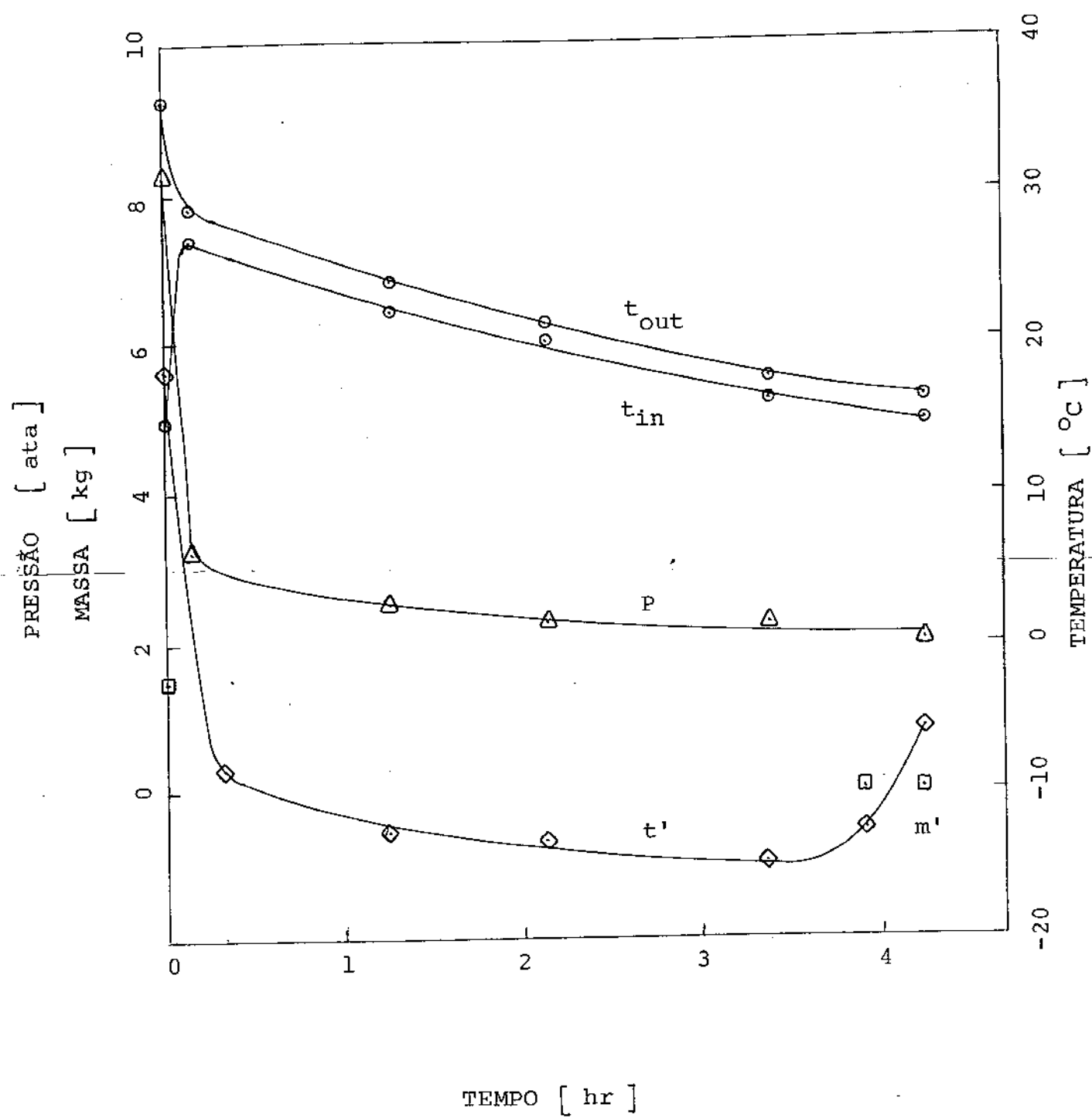


FIG. 8 - Variação de alguns parâmetros durante o período de absorção da noite de 11-11 para 12-11.

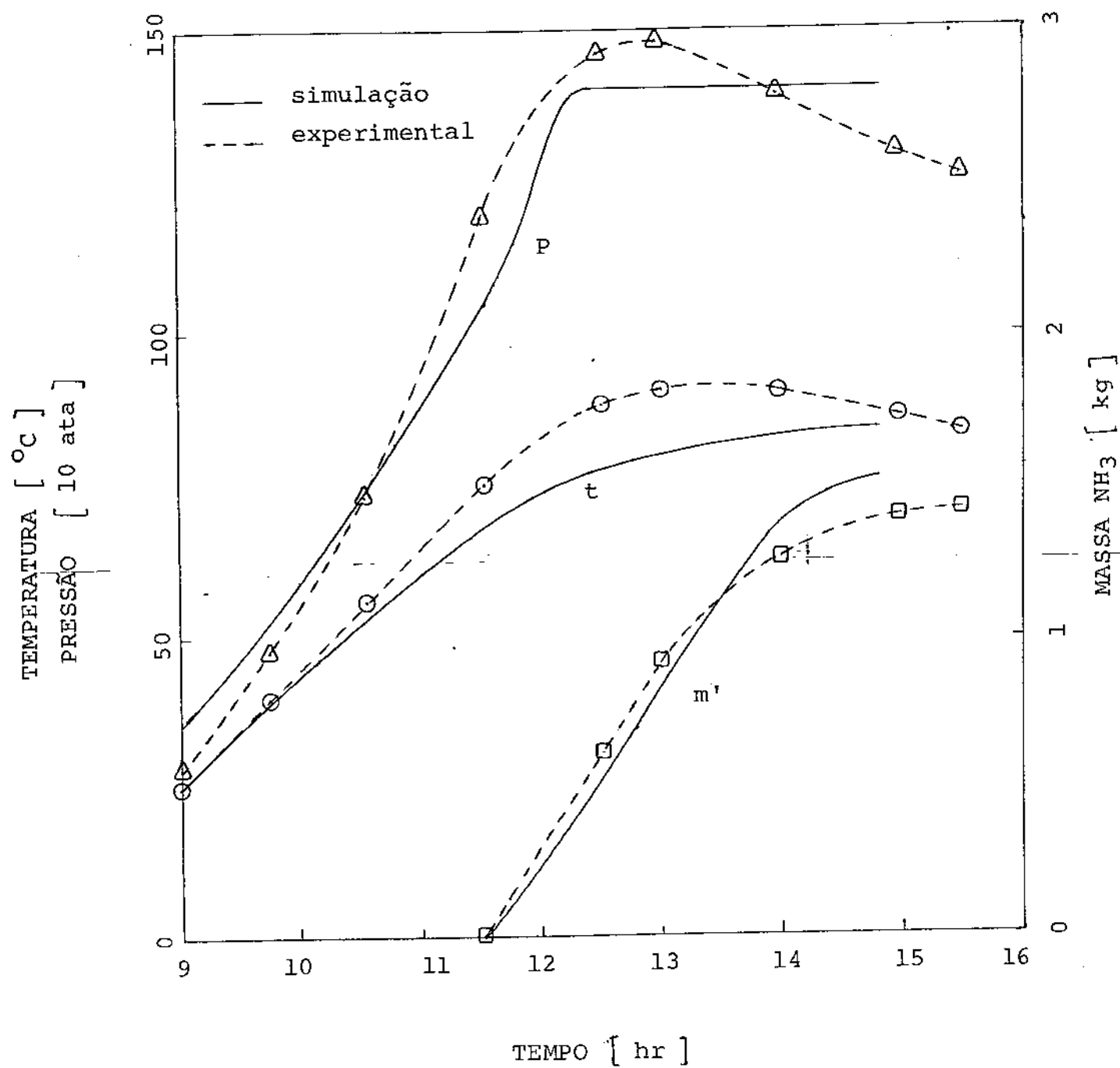


FIG. 9 - Simulação do período de geração do dia 27-8 e comparação com os resultados experimentais.

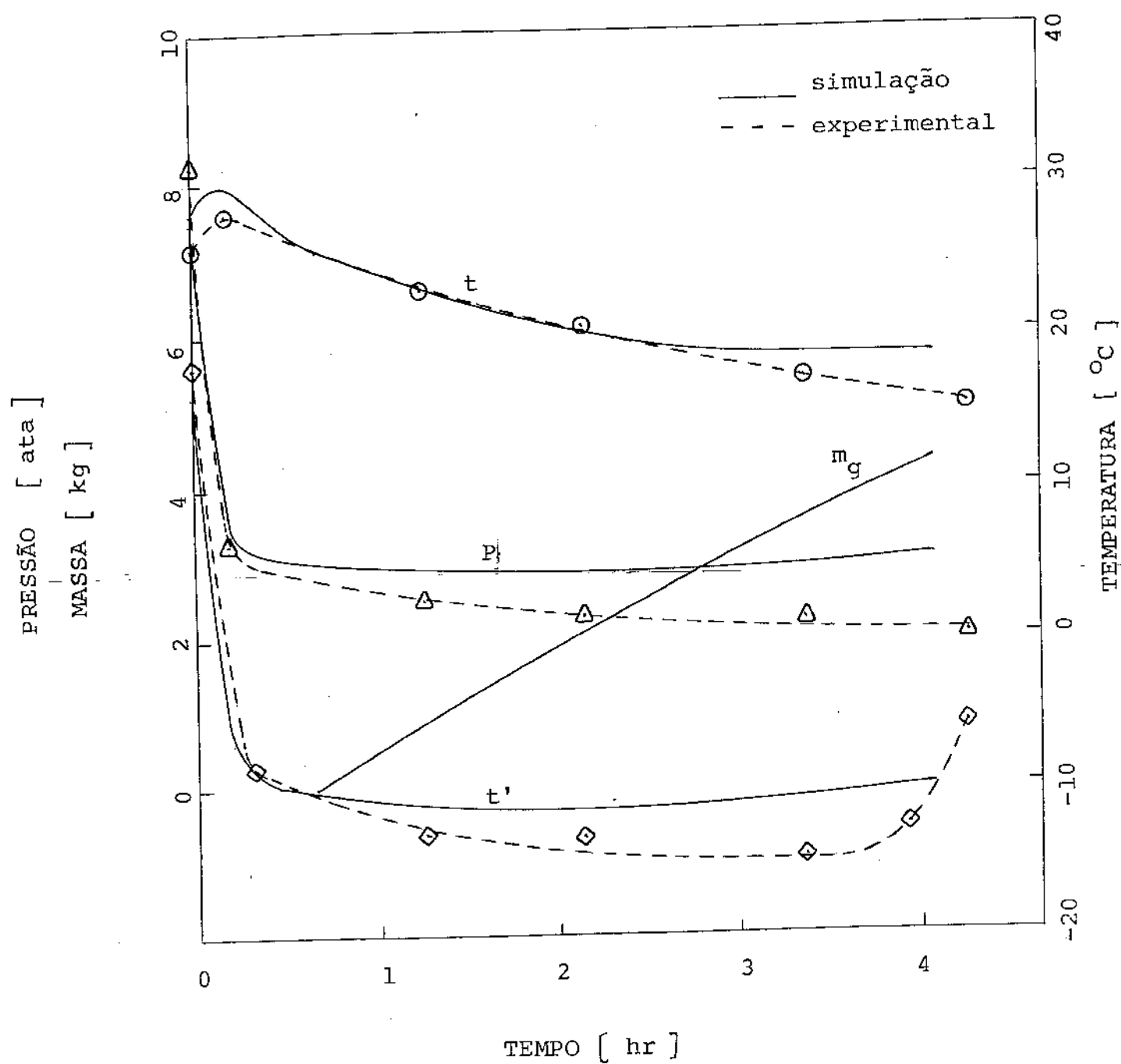


FIG. 10 - Simulação do período de absorção da noite de 11-11 para 12-11 e comparação com os resultados experimentais.

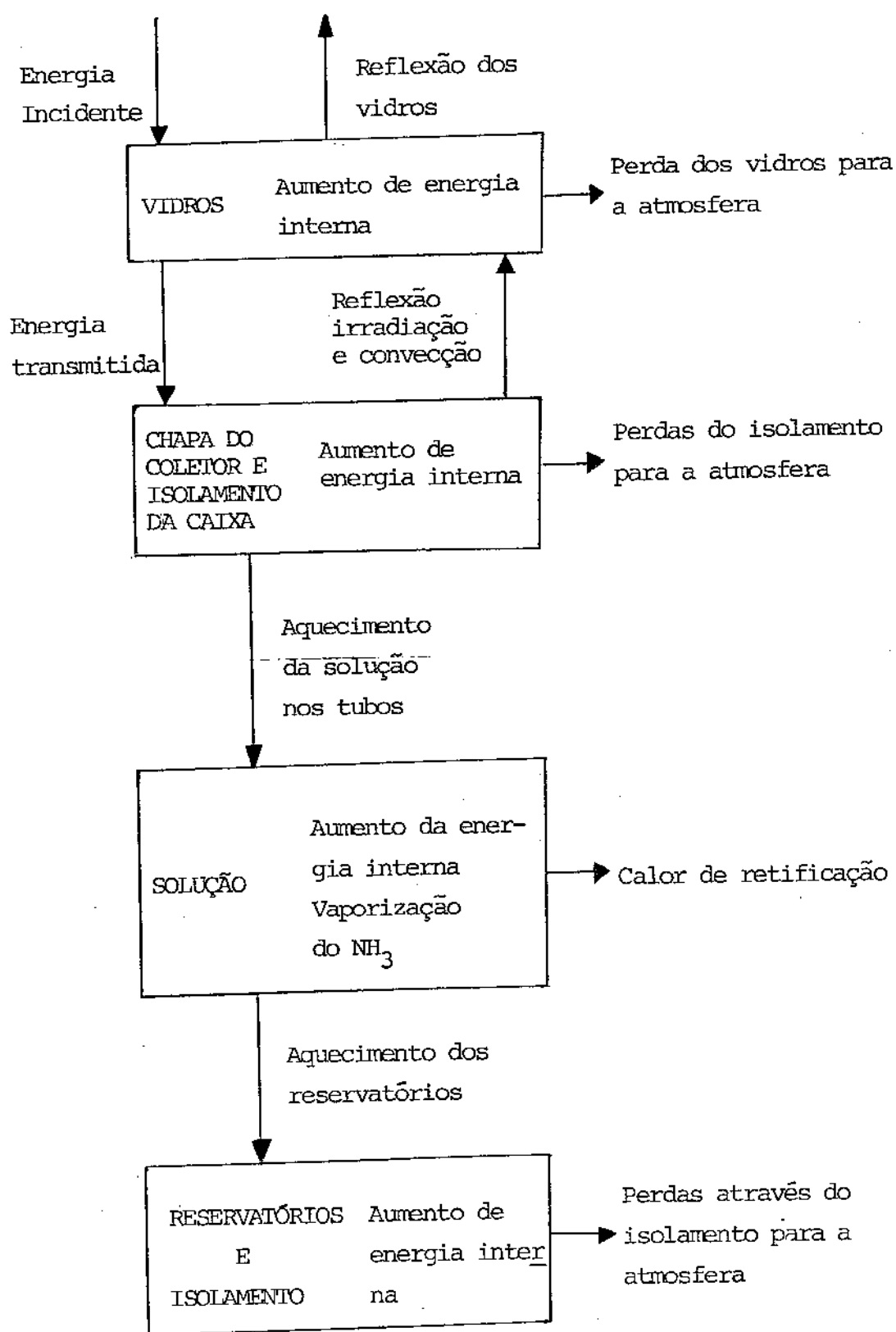


FIG. 11 - Diagrama dos fluxos de calor no gerador

LISTA DE SÍMBOLOS

α	absortividade da chapa do coletor
Δm	variação de massa entre os instantes 1 e 2
ξ	concentração de amônia
τ	transmissividade da cobertura de dois vidros
A	área do coletor
C	capacidade térmica do gerador
c	calor específico da água
f	eficiência de aleta do coletor
h	entalpia específica
h_{fus}	calor latente de fusão do gelo
i	instante de tempo
m	massa de solução, amônia ou vapor
m_A	massa de água
m_G	massa de gelo formado
$q_{R\ 1-2}$	energia radiante incidente entre os instantes 1 e 2
Q_C	calor devido à capacidade térmica do coletor, reservatórios e isolamento
Q_{LT}	energia refletida + calor perdido através dos vidros e isolamento + calor rejeitado no retificador
Q_r	resfriamento efetivo durante a absorção
Q_R	energia incidente total durante a geração
$Q_{refletido}$	parcela da energia incidente refletida pelos vidros do coletor
Q_u	calor útil recebido pela solução
t	temperatura
t_A	temperatura ambiente
t_{AG}	temperatura de água que vai congelar
t_{eq}	temperatura de equilíbrio de solução para dada pressão e concentração

t_{in}	temperatura na entrada do coletor, termopar 2
t_{out}	temperatura na saída do coletor, termopar 1
u	energia interna específica
U_A	coeficiente global de troca de calor do absorvedor
U_E	coeficiente de troca de calor do evaporador
U_L	coeficiente de perdas do gerador

ÍNDICES:

1,2	instantes e/ou estados sucessivos
a	estado anterior à abertura da válvula de absorção
b	estado imediatamente posterior à abertura da válvula de absorção.
c	condensação
o	solução rica
p	solução pobre
	solução água-amônia
'	amônia líquida no evaporador
"	vapor de amônia
—	médio

REFERÊNCIAS

- [1] Williams, D.A., Chung, R., Lof, G.O.G., Fester, D.A., and Duffie, J.A., "Intermittent Absorption Cooling Systems with Solar Regeneration", Paper No. 57-A-60, ASME (1957).
- [2] Williams, D.A., Chung, R., Lof, G.O.G., Fester, D.A., and Duffie, J.A., "Cooling Systems based on Solar Regeneration", Refrigeration Eng. (November, 1958), 33.
- [3] Chinnappa, J.C.V., "Performance of an intermittent refrigerator operated by a flat plate collector", Solar Energy 6, 143-150, (1962).
- [4] Chinnappa, J.C.V., "Experimental Study of the Intermittent Vapour Absorption Refrigeration Cycle employing the Refrigerant-Absorbent Systems of Ammonia-Water and Ammonia-Lithium Nitrate", Solar Energy, 5, 1-18 (1961).
- [5] Prata, S., "Premiers Resultants obtenus avec un Refrigerateur Solaire a Absorption Intermittente utilisant des Collecteurs plans comme elements de chauffage".
- [6] Trombe, F., Foex, M., "The Production of Cold by Means of Solar Radiation", Solar Energy, I, 1, (1957) 51.
- [7] Swartman, R.K., Ha, V., and Swaminathan, C., "Comparison of Ammonia-Water and Ammonia-Sodium Thiocyanate as the refrigerant-absorbent in a solar refrigeration system", Solar Energy, vol. 17, 123-127 (1975)
- [8] Andrews, H.I., "Solid Absorption Machine for use on Trains", Mod. Refrig. (September, 1955), 330.

- [9] Klein, S.A., Duffie, J.A., Beckman, W.A., "Transient Considerations of Flat-Plate Collectors", Journal of Engineering for Power (April, 1974), 109-113.

- [10] Niebergall, Wilhelm, "Sorptions - Kältemaschinen", Handbuch der Kältetechnik, Springer-Verlag, Berlin, 1959.

A P Ê N D I C E

A - ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE PERDAS U_L

O coeficiente de perdas do gerador U_L foi estimado usando os balanços energéticos dos dias medidos, tomando-se então o valor médio de 6,2 Kcal/hr.m².°C. Os desvios dos valores calculados em relação ao valor tomado são menores que 10%.

Como exemplo do procedimento usado, são mostrados abaixo os cálculos para o dia 27-8-76.

Por definição:

$$U_L = \frac{(Q_{LT} - Q_{\text{refletido}})}{A \cdot (\overline{t} - t_A) \cdot \text{Duração do período de geração}} \quad (22)$$

Q_{LT} foi estimado em 5260 Kcal (TABELA II). Notar que neste valor está incluído o calor de retificação.

$Q_{\text{refletido}}$ é estimado considerando uma refletância média das duas camadas de vidro de 26%. Assim, para o valor da energia incidente Q_R de 7600 Kcal, o valor de $Q_{\text{refletido}}$ será 1980 Kcal.

A diferença de temperatura média $(\overline{t} - t_A)$ é obtida a partir das curvas medidas de t_{out} e t_A . Considerando-se $t = t_{\text{out}}$, o valor encontrado para o dia 27-8 é 45°C.

Além disso temos:

$$A = 1,84 \text{ m}^2$$

Duração do período de geração: 6,2 hr.

Donde:

$$U_L = \frac{(5260 - 1980) \text{ Kcal}}{1,84 \text{ m}^2 \cdot 45^\circ\text{C} \cdot 6,2 \text{ hr}} = 6,4 \text{ Kcal/hr.m}^2.\text{°C}$$

B. LISTAGEM DO PROGRAMA GER

```

PROGRAMA GER - PERIODO DIURNO
COMMON W(3,13),Y(3,13),Z(3,7,7)
REAL H,MH,I,II,M,MR,MA,MS, IDIF, IDIR1, IDIR2, ILS, MPC, MPR, NS

NR=41
NW=32

LEITURA DAS TABELAS
DO 16 N=1,3
  READ(NR,111)(W(N,J),J=1,7),(Y(N,K),K=1,7)
16 READ(NR,111)(Z(N,J,K),K=1,7),J=1,7)
DO 15 N=4,3
  READ(NR,111)(W(N,J),J=1,13)
15 READ(NR,111)(Y(N,J),J=1,13)
111 FORMAT(16F5.2)

LEITURA DOS DADOS
READ(NR,121)NDADOS
121 FORMAT(I2)
ND=3
13 ND=ND+1
DADOS DO EQUIPAMENTO, CONDICÖES INICIAIS, ATMOSFERA E INSOLACAO
  READ(NR,111)DA,C,F,UL,PCO,H,T,X,N,NS,IDIF,IA,TAM
PARAMETROS DE CALCULO
READ(NR,122)NP,NA,NG,EX
122 FORMAT(3I2,F12.3)

WRITE(NW,513)
513 FORMAT(///72H-----)
1-----
WRITE(NW,153)DA,C,UL,UC,F,UA,UE
153 FORMAT( 5X,2HA=,F4.1 / 5X,2HC=,F4.1,12X,3HUL=, F5.1,12X,3HUC=,F6
1.2/5X,2HF=,F4.2,12X,3HUA=,F5.1,12X,3HUE=,F6.2// 72H----- )
2-----

WRITE(NW,131)
131 FORMAT( 5X,1RH,3X,1MP,3X,1HT,3X,1HX,3X,2HMR,7X,1RH,3X,1HS,3X,2H
1G/)

CALCULO DO PERIODO DE AUMENTO DA PRESSAO

MR=2.
P=3.
DP=1.
DTP=-1.
17 P=P+DP
CALL INTERP(1,X,P,TO)
IF(ABS(TC-T).LT..1)GO TO 19
IF((TC-T)*DTP.GE.0.)GO TO 13
DP=-DP/2.
13 DTP=TC-T
GO TO 17
19 WRITE(NW,333)H,P,T,X
333 FORMAT(2F9.2,F9.1,F9.3)
CALL INTERP(2,X,P,I)
ANG=(2.*H-24.+MS)*90./MS
CALL INTER(5,ANG,IR)
CALL INTER(6,ANG,AB)
CALL INTER(7,H,IDIR1)
IDIR1=TA*AB*IDIR1
CALL INTER(8,H,TA1)
PC=12.
DP=1.
DTP=-1.
22 PC=PC+DP
CALL INTERP(1,1.,PC,TO)
IF(ABS(TO-TA).LT..1)GO TO 23
IF((TO-TA)*DTP.GE.0.)GO TO 21
DP=-DP/2.
21 DTP=TO-TA
GO TO 22
23 DP=(PC-P)/FLOAT(NP)
H=0

```

```

23 N=N+1
PP=Q+DP
CALL INTERP(1,N,PP,TT)
CALL INTERP(2,N,PP,II)
Q3=Q*(II-I)+C*(TT-T)
NH=H
QA=Q.
DH=.24
DQ=-1.
22 NH=IH+DH
QAC=QA
ANGA12=.5*(NH-24.+HS)*92./HS
CALL INTERI(5,ANG,TR)
CALL INTERI(6,ANG,AB)
CALL INTERI(7,NH,DIR2)
DIR2=TA*AB*DIR2
CALL INTERI(3,NH,TA2)
IA=QA+((DIR1+DIR2)/2.+IDIF*.77*.96)*(DH)
QA=QA*(IA-UL*((TT+T)/2.- (TA1+TA2)/2.)*(NH-H))
IF(ABS((Q3-Q3)/Q3).LT..3)GO TO 23
IF((NH-23).LT..3)GO TO 24
NH=NH-23

```

```

QA=QAC
DH= DH/2.
GO TO 22
24 DIR1=DIR2
GO TO 22
29 P=PP
T=TT
I=II
H=NH
DIR1=DIR2
TA1=TA2
IF(N.EQ.NP)GO TO 25
WRITE(NH,333)H,P,T,X
GO TO 23
25 WRITE(NH,445)H,P,T,X,NH,N
445 FORMAT(2F9.2,F9.1,F9.3,2F9.2/)

```

CALCULO DO PERIODO DE CONDENSACAO

```

FINC=2.
CALL INTERP(3,PC,T,V)
IF(V.GT.92222.)GO TO 123
CALL INTERP(1,1.,PC,R)
CALL INTERP(2,1.,PC,E)
PP=QCO
33 XX=Y-DX
DM=(X-XX)*M/(1.-XX)
IF(DM.LT..32)GO TO 49
CALL INTERP(1,XX,PP,TT)
CALL INTERP(2,XX,PP,II)
CALL INTERP(3,PP,TT,VV)
IF(VV.GT.92222.)GO TO 137
QS=(DM*VV+(H-DM)*II-M*I)+C*(TT-T)
33 NH=I
QA=Q.
DH=.24
DQ=-1.
33 NH=IH+DH
QAC=QA
ANG=(2.*NH-24.+HS)*92./HS
IF(NH.LE.(12.+HS/2.))GO TO 34
FINC=9.
DX=DX/2.
GO TO 33
34 CALL INTERI(5,ANG,TR)
CALL INTERI(6,ANG,AB)
CALL INTERI(7,NH,DIR2)
DIR2=TA*AB*DIR2
CALL INTERI(3,NH,TA2)
QA=QA+((DIR1+DIR2)/2.+IDIF*.77*.96)*(DH)
QA=QA*(IA-UL*((TT+T)/2.- (TA1+TA2)/2.)*(NH-H))
IF(ABS((Q3-Q3)/Q3).LT..3)GO TO 44
IF((Q3-Q3).LT..3)GO TO 35
NH=NH-DH
QA=QAC
DH= DH/2.
35 DIR1=DIR2
GO TO 33
44 NH=NH+DH

```

```

M=M-DM
N=IN
P=PP
T=TT
X=XX
V=VV
I=II
R=RR
S=SS
ICIRI=IDIR2
TAI=1A2
IF(FINC.22.3.333 TO 32
WRITE(NW,444)M,P,T,X,RR,N
444 FORMAT(2F9.2,F9.1,F9.3,2F9.2)
GO TO 32
4S WRITE(NW,555)M,P,T,X,RR,N,R
555 FORMAT(2F9.2,F9.1,F9.3,3F9.2/)
-----
1332 IF(ND.LT.NDAD3)GO TO 13
GO TO 1332
133 WRITE(NW,333)
333 FORMAT(/5X,32MENTALPIA DO VAPOR FORA DA TABELA/)
GO TO 1332
1332 END

```

```

.1 .2 .3 .4 .5 .6 1. 1.4 3.2 4.5 7.3 11. 15. 23.
2. 133. 113. 134. 150. 103. 131. 56. 79. 52. 129. 123. 142. 156. 33.
53.
89. 37. 125. 119. 131. 13. 43. 52. 63. 85. 97. 117. 2. 13. 35
52.
36. 73. 92. -13. 12. 22. 36. 52. 64. 76. -23. -13. 2. 13. 23
33.
4.
.1 .2 .3 .4 .5 .6 1. 1.4 3.2 4.5 7.3 11. 15. 23.
59. 94. 112. 126. 147. 163. 132. 33. 62. 75. 95. 115. 133. 151. 12
35.
4. 57. 85. 122. 118. -7. 15. 23. 46. 66. 31. 97. -17. 5. 18
34.
53. 67. 82. -17. 5. 17. 32. 52. 64. 73. 53. 73. 34. 97. 11
4 126.
141.
2. 4. 7. 12. 13. 16. 22. 12. 33. 52. 73. 93. 123. 152.
395. 426. 417. 427. 433. 455. 471. 391. 424. 415. 425. 436. 453. 472. 33
5. 399.
41. 423. 434. 431. 453. 392. 396. 437. 422. 431. 442. 455. 999. 333. 42
13. 417.
32. 447. 465. 999 999 422. 414. 427. 446. 404. 999 999 393. 412. 42
13. 443.
41.
1.4 2. 3. 5. 12. 13.
375. 332. 332. 335. 392. 391.
2. 12. 22. 33. 42. 52. 92. 132. 142. 152. 162. 172. 132.
23 .25 .53 .67 .73 .75 .77 .75 .73 .67 .53 .25 .23
2. 12. 23. 32. 42. 52. 92. 132. 142. 152. 162. 172. 132.
.62 .67 .32 .33 .92 .94 .96 .94 .92 .33 .32 .67 .32
7. 3.5 10.5 12. 13.5 14.4 14.6 14.3 17.
2. 381. 726. 734. 726. 533. 524. 422. 2.
7. 17.
29. 29.
1
1134957.3 .23. 5.932 13. 12. 52. 25.
6 4 4 .2F

```

C- LISTAGEM DO PROGRAMA ABS

```

C      PROGRAMA ABS - PERIODO NOTURNO
C
C      COMMON W(3,13),Y(3,13),Z(3,7,7)
C      REAL H,I,II,H,MR,NA,ILS,NG,MRS
C      PROPRIEDADES DA AGUA
C      DATA CP,ILS/1.,32./
C
C      NR=42
C      NM=35
C
C      LEITURA DAS TABELAS
C      DO 16 N=1,3
C      READ(NR,111)(W(N,J),J=1,7),(Y(N,K),K=1,7)
15 READ(NR,111)(Z(N,J,K),K=1,7),J=1,7)
C      DO 15 N=4,7
C      READ(NR,111)(W(N,J),J=1,13)
15 READ(NR,111)(Y(N,J),J=1,13)
111 FORMAT(13F5.3)
C
C      DATA      A,C,UA,UE,UEP,XZ,MRS/1.34,7.,15.,9.,3.,.52,13./
C      DATA H,I,MR,NA,TA /0.,28.,1.46,4.3,15./
C      DATA NA,NG/4,4/
C      WRITE(NW,513)
512 FORMAT(///72H-----)
1-
C      WRITE(NW,152)A,C,UEP,UA,UE
152 FORMAT(15X,2HA=,F4.1 / 5X,2HC=,F4.1,12X,13X,4HUEP=,F
15.2/21X,3HUA=,F3.1,12X,3HUE=,F3.2//72H-----)
2-
C      WRITE(NW,131)----
131 FORMAT(15X,1HN,8X,1HP,8X,1HT,3X,1HX,3X,2HMR,7X,1HI,3X,1HG,8X,2HNI
13/)
C
C      =====
C      CALCULO DA QUEDA DE PRESSAO
C      N=NR12-NR
C      P=3.
C      DP=1.
C      DTP=-1.
17 P=P+DP
C      CALL INTERP(1,1.,P,TAA)
C      IF(ABS(DP).LT..3)GO TO 19
C      IF((TAA-TA)*DTP.GE.2.)GO TO 13
C      DP=-DP/2.
13 DTP=TAA-TA
C      GO TO 17
19 CALL INTER1(4,P,V)
C      CALL INTERP(2,1.,P,E)
C      X=(X2*MRS-MR)/(NR12-MR)
C      PS=3.
C      DP=1.
C      DTP=-1.
27 PS=PS+DP
C      CALL INTERP(1,X,PS,TS)
C      IF(ABS(DP).LT..1)GO TO 29
C      IF((TS-T)*DTP.GE.2.)GO TO 23
C      DP=-DP/2.
23 DTP=TS-T
C      GOTO 27
29 CALL INTERP(2,X,PS,I)
C      WRITE(NW,555)H,P,T,X,MR,M,PS
C      PP=4.
C      EP=-.5
C      DLM=-1.
23 PP=PP+EP
C      CALL INTERP(2,1.,PP,ED)
C      CALL INTER1(4,PP,VV)
C      MRS=MR*EXP((EE-E)*2./(VV+V-EE-E))
C      DM=MR-MRS
C      XX=(X*(MR-MR)+DM)/(MR-MR+DM)
C      CALL INTERP(1,XX,PP,TD)
C      CALL INTERP(2,XX,PP,II)
C      DML=(D*(TD-T)+(X+DM)*II-M*I)*2./(VV+V)
C      IF(ABS(DM-DML)/DM.LT..3)GO TO 43
C      IF((DM-DML)*DML.GE.2.)GO TO 24
C      DP=-DP/2.
24 DEN=DM-DML
C      GO TO 23

```

```

49      G=TA
        M=M+DM
        MR=MR-DM
        E=EE
        CALL INTERP(1,1.,PP,R)
        V=VV
        I=II
        X=XX
        T=TT
        P=QP

        CALCULO DO RESFRIAMENTO DA AGUA
        NG=2.
        WRITE(NW,667)H,P,T,X,MR,M,G,NG
        GO=-0.7/FLOAT(NG)

```

```

59      N=N+1
        GG=G+EG
        PP=P
        DP=-.5
        DDH=-1.
        NUM=3
53      PP=QP+DP
        NUM=NUM+1
        IF(NUM.GT.133)GO TO 1333
        CALL INTERP(1,1.,PP,RR)
        IF(RR.GT.33)GO TO 53
        CALL INTERP(2,1.,PP,EE)
        CALL INTERP(4,PP,VV)
        DH=2.*MA*CP*(G-GG)/(UE*(G+GG-R-RR))
        DM=(MA*CP*(G-GG)+MR*(E-EE) +UEP*DH*(TA-(R+RR)/2.))/(VV-EE)
        XX=(X*(M+DM))/(M+DM)
        CALL INTERP(1,XX,PP,IT)
        CALL INTERP(2,XX,PP,II)
        DMA=(C*(T-TT)+M*I+DM*VV-(M+DM)*II)/(UA*A*((T+IT)/2.-TA))
        IF(ABS((DM-DMA)/DMA).LT..21)GO TO 57
        IF((DMA-DM)*DM.GE..2)GO TO 55
        DP=-DP/2.
55      DM=DMA-DM
        GO TO 53
57      P=QP
        T=TT
        X=XX
        M=M+DM
        I=II
        V=VV
        R=RR
        E=EE
        G=GG
        M=M+DM
        MR=MR-DM
        IF(N.EQ.JA)GO TO 53
        WRITE(NW,555)H,P,T,X,MR,M,G
555     FORMAT(2F9.2,F9.1,F9.3,3F9.2)
        GO TO 53
53      WRITE(NW,657)H,P,T,X,MR,M,G,NG
537     FORMAT(2F9.2,F9.1,F9.3,4F9.2)

```

----- CALCULO DO PERIODO DE FORMACAO DE GELO

```

        G=0.
        DMG=MA/FLOAT(NG)
        N=2
52      N=N+1
        NG=NG+DMG
        PP=P
        DP=-.5
        DDH=-1.
54      PP=PP+DP
        CALL INTERP(1,1.,PP,RR)
        CALL INTERP(2,1.,PP,EE)
        CALL INTERP(4,PP,VV)
        DH=-2.*DMG*ILS/(UE*(R+RR))
        DM=(DMG*ILS+MR*(E-EE) +UEP*DH*(TA-(R+RR)/2.))/(VV-EE)
        XX=(X*(M+DM))/(M+DM)
        CALL INTERP(1,XX,PP,IT)
        CALL INTERP(2,XX,PP,II)
        DMA=(C*(T-TT)+M*I+DM*VV-(M+DM)*II)/(UA*A*((T+IT)/2.-TA))
        IF(ABS((DM-DMA)/DMA).LT..21)GO TO 53
        IF((DMA-DM)*DM.GE..2)GO TO 56

```

```

DP=-DP/2.
66 DDH=DHA-DH
GO TO 64
63 P=PP
T=TT
X=XX
H=I+DH
I=II
V=VV
R=RR
E=EE
M=M+DH
MR=MR-DH
WRITE(NW,666)H,P,T,X,MR,M,G,MG
666 FORMAT(2F9.2,F9.1,F9.3,4F9.2)
IF(MR.LT.3.)GO TO 69
IF(M.EQ.0.)GO TO 73
GO TO 62
69 WRITE(NW,620)
622 FORMAT( /5X, 15HACABOU A AMONIA /)
GO TO 1332
C -----
C CALCULO DO RESFRIAMENTO DO GELO
73 WRITE(NW,777)
777 FORMAT( /5X, 22HTODA A AGUA CONGELOU /)
C
1332 END

```

D - LISTAGEM DAS SUBROTINAS

INTERPOLACAO EM FUNCOES DE DUAS VARIAVEIS

```
SUBROUTINE INTERP(K,XX,YY,ZZ)
COMMON X(3,13),Y(3,13),Z(3,7,7)
```

```

IF (XX-X(K,1))11,22,22
11 ZZ=-99999.
RETURN
22 DO 33 I=2,7
   IF (XX-X(K,I))55,44,33
33 CONTINUE
   I=I+1
44 IF (I-7)33,55,11
55 I2=I
   I1=I-1
   IF (YY-Y(K,I))11,66,66
66 DO 77 J=2,7
   IF (YY-Y(K,J))99,33,77
77 CONTINUE
   J=J+1
88 IF (J-7)77,99,11
99 J2=J
   J1=J-1
   IF (Z(K,I1,J1).GT.99999.)GO TO 122
   IF (Z(K,I1,J2).GT.99999.)GO TO 122
   IF (Z(K,I2,J1).GT.99999.)GO TO 122
   IF (Z(K,I2,J2).GT.99999.)GO TO 122
   Z1=Z(K,I1,J1)+(Z(K,I2,J1)-Z(K,I1,J1))*(XX-X(K,I1))/(X(K,I2)-X(K,I1))
   Z2=Z(K,I1,J2)+(Z(K,I2,J2)-Z(K,I1,J2))*(XX-X(K,I1))/(X(K,I2)-X(K,I1))
   ZZ=Z1+(Z2-Z1)*(YY-Y(K,J1))/(Y(K,J2)-Y(K,J1))
RETURN
132 ZZ=99999.
RETURN
END
```

INTERPOLACAO LINEAR

```
SUBROUTINE INTERL(K,XX,YY)
COMMON X(2,13),Y(3,13),Z(3,7,7)
```

```

IF (XX-X(K,1))11,22,22
11 ZZ=-99999.
RETURN
22 DO 33 I=2,13
   IF (XX-X(K,I))55,44,33
33 CONTINUE
   I=I+1
44 IF (I-13)33,55,11
55 I2=I
   I1=I-1
   YY=Y(K,I1)+(Y(K,I2)-Y(K,I1))*(XX-X(K,I1))/(X(K,I2)-X(K,I1))
RETURN
END
```