

SVETLANA FRANCISCA GALVÃO BUENO SRESNEWSKY  
ENG. QUÍMICA, ESCOLA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
MACKENZIE, 1975

ESTUDO DE CICLOS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO QUANTO  
A SUA APLICAÇÃO E FONTE ENERGÉTICA

dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de "Mestre em Engenharia"

Orientador:  
Prof. Titular Eitaro Yamane  
Depto. de Eng. Mecânica - EPUSP

São Paulo, 1983

A minha falecida mãe, Francisca,  
ao meu pai, Igor e aos meus  
irmãos.

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

Ao Professor Eitaro Yamane, Titular do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica - USP, pela sua grande dedicação, presteza e colaboração - na orientação da minha dissertação.

À Srta. Ivan Rocha da Silva, pela exemplar da tilografia.

A Promon Engenharia S.A., pelo empréstimo de suas referências bibliográficas.

A todos os meus amigos pela sua compreensão e incentivo.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é a análise teórica dos diversos ciclos de refrigeração por absorção, tendo em vista o aproveitamento adequado de determinadas fontes energéticas.

Foram analisados os efeitos da variação dos principais parâmetros sobre o coeficiente de desempenho e sobre o calor trocado em cada equipamento do ciclo.

Vários tipos de ciclos de absorção são comparados relativamente ao seu desempenho e aplicação.

## ABSTRACT

This work theoretically analyses some absorption refrigeration cycles concerning the utilization of a suitable energy source.

The effects of a given set of parameters on the cycle coefficient of performance and on each cycle equipment heat transfer are analysed.

Different absorption refrigeration cycles are compared relative to their performance and applications.

ESTUDO DE CICLOS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO QUANTO À SUA  
APLICAÇÃO E FONTE ENERGÉTICA.

	ÍNDICE	Pág.
1.	- Introdução .....	1
1.1	- Objetivo do estudo .....	1
1.2	- Ciclo de refrigeração de compressão de vapor .....	2
1.3	- Ciclos de refrigeração de absorção básico .....	4
1.3.1	- Contínuo .....	4
1.3.2	- "Platen - Munters" contínuo .....	5
1.3.3	- Intermitente .....	7
1.3.4	- Ciclo de efeito duplo .....	7
1.3.5	- Ciclo real de absorção completo .....	9
1.4	- Tipos e requisitos básicos do par absorvente-refri- gerante .....	19
2.	- Cálculo dos Ciclos de Absorção .....	23
2.1	- Equações básicas .....	23
2.2	- Fixação do intervalo de variação dos parâmetros ..	38
2.3	- Ciclo de absorção de amônia e água .....	42
2.4	- Ciclo de absorção de água e brometo de lítio .....	63
3.	- Interpretação gráfica dos Resultados Teóricos Obti- dos .....	69

	Pág.
4 - Discussões e Conclusões Finais.....	90
4.1 - Ciclos de absorção de amônia e água, e de água e brometo de lítio.....	90
4.2 - Comparação entre os ciclos de absorção de amônia e água e de água e brometo de lítio	96
4.3 - Fontes energéticas empregadas nos ciclos..	98
4.4 - Conclusões finais.....	107
Referências Bibliográficas.....	112

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 - Ciclo de Refrigeração à Compressão à Vapor .....	11
Figura 2 - Ciclo A - Ciclo Básico de Absorção - Amônia e Água .....	12
Ciclo F - Ciclo Básico de Absorção - Água e Brometo de Lítio...	
Figura 3 - Ciclo B - Ciclo Completo de Absorção Amônia e Água.....	13
Figura 4 - Ciclo C - Ciclo Completo de Absorção Amônia e Água sem o Pré-Resfriador.....	14
Figura 5 - Ciclo D - Ciclo Completo de Absorção Amônia e Água sem o Pré-Resfriador e a Serpentina de Fundo do Gerador.....	15
Figura 6 - Ciclo E - Ciclo Completo de Absorção Amônia e Água sem o Pré-resfriador, sem serpentina de Fundo e Superior do Gerador e sem o Trocador de Calor - dos Licores.....	16
Figura 7 - Ciclo de Absorção "Platen-Munters" contínuos.....	17
Figura 8 - Ciclo de Absorção de Efeito Duplo....	18

	Pág.
Figura 9 - Coeficiente de Desempenho ( $\beta$ ) vs Temperatura do Condensador ( $t_c$ ) para os Casos A1, A2 e A3.....	74
Figura 10 - Coeficiente de Desempenho ( $\beta$ ) vs Temperatura do Absorvedor ( $t_a$ ), para os Casos A1, A4 e A5.....	74
Figura 11 - Coeficiente de Desempenho ( $\beta$ ) vs Temperatura do Absorvedor ( $t_a$ ), para os Casos A3, A6 e A7.....	75
Figura 12 - Coeficiente de Desempenho ( $\beta$ ) vs Temperatura do Evaporador ( $t_e$ ), para os Casos A1, A10, A11 e A12.....	75
Figura 13 - Coeficiente de Desempenho ( $\beta$ ) vs Diferença de Concentrações entre os Licores ( $\Delta x$ ), para os Casos A1, A8 e A9.....	76
Figura 14 - Coeficiente de Desempenho ( $\beta$ ) vs Temperatura do Condensador ( $t_c$ ) para os Casos B1, B2, B3, C1, C2, C3, D1, D2, D3, E1, E2 e E3.....	76
Figura 15 - Coeficiente de Desempenho ( $\beta$ ) vs Temperatura do Absorvedor ( $t_a$ ), para os Casos B1, B4, B5, C1, C4, C5, D1, D4, D5, E1, E4 e E5.....	77

Pág.

Figura 16	-	Coeficiente de Desempenho ( $\beta$ ) vs Temperatura do Absorvedor ( $t_a$ ), para os Casos B3, B6, B7, C3, C6, C7, D3, D6, D7, E3, E6 e E7.....	77
Figura 17	-	Calor do Absorvedor, Gerador e Condensador versus Temperatura do Condensador ( $t_c$ ), para os Casos A1, A2 e A3.....	78
Figura 18	-	Calor do Absorvedor, Gerador e Condensador versus Temperatura do Absorvedor ( $t_a$ ), para os Casos A1, A4 e A5	78
Figura 19	-	Calor do Absorvedor, Gerador e Condensador versus Temperatura do Absorvedor ( $t_a$ ), para os Casos A3, A6 e A7	79
Figura 20	-	Calor do Absorvedor, Gerador e Condensador versus Diferença de Concentrações dos Licores ( $\Delta x$ ), para os Casos A1, A8 e A9.....	79
Figura 21	-	Calor do Absorvedor, Gerador e Condensador versus Temperatura do Condensador ( $t_c$ ), para os Casos B1, B2 e B3.....	80
Figura 22	-	Calor do Absorvedor, Gerador e Condensador versus Temperatura do Absorvedor ( $t_a$ ), para os Casos B1, B4 e B5	80

Figura 23	- Calor do Absorvedor, Gerador e Condensador versus Temperatura do Absorvedor ( $t_a$ ), para os Casos B3, B6 e B7	81
Figura 24	- Calor do Absorvedor, Gerador e Condensador versus Temperatura do Evaporador ( $t_e$ ), para os Casos A1, A10, A11 e A12.....	81
Figura 25	- Coeficiente de Desempenho ( $\beta$ ) versus Temperatura do Condensador ( $t_c$ ), para os Casos F1, F2, F3.....	82
Figura 26	- Coeficiente de Desempenho ( $\beta$ ) versus Temperatura do Absorvedor ( $t_a$ ), para os Casos F1, F4 e F5.....	82
Figura 27	- Coeficiente de Desempenho ( $\beta$ ) versus Temperatura do Absorvedor ( $t_a$ ), para os Casos F3 e F6.....	83
Figura 28	- Coeficiente de Desempenho ( $\beta$ ) versus Temperatura do Evaporador ( $t_e$ ), para os Casos F1, F7 e F8.....	83
Figura 29	- Coeficiente de Desempenho ( $\beta$ ) versus Diferença de Concentrações nos Licores ( $\Delta x$ ), para os Casos F1, F9 e F10.	84
Figura 30	- Calor do Absorvedor, Gerador e Condensador versus Temperatura do Absorvedor ( $t_a$ ), para os Casos F1, F4 e F5...	84

Figura 31	- Calor do Absorvedor, Gerador e Condensador versus Temperatura do Absorvedor ( $t_a$ ), para os Casos F3 e F6...	85
Figura 32	- Calor do Absorvedor, Gerador e Condensador versus Temperatura do Condensador ( $t_c$ ), para os Casos F1, F2 e F3.....	85
Figura 33	- Calor do Absorvedor, Gerador e Condensador versus Temperatura do Evaporador ( $t_e$ ), para os Casos F1, F7 e F8	86
Figura 34	- Calor do Absorvedor, Gerador e Condensador versus Diferença de Concentrações entre os Licores ( $\Delta x$ ), para os Casos F1, F9 e F10.....	86
Figura 35	- Diagrama de Entalpia versus Concentração para Mistura Amônia e Água....	87
Figura 36	- Ábaco do Equilíbrio para Soluções Aquosas de Brometo de Lítio.....	88
Figura 37	- Diagrama de Entalpia versus Concentração para Combinações de Brometo de Lítio e Água .....	89
Figura 38	- Exemplo de esquema de um ciclo de absorção empregando energia solar como fonte térmica.....	108
Figura 39 A/B/C	- Tipos de Coletores Solares....	109/111

## NOMENCLATURA

$E_{vc}$	- Energia total do volume de controle	kcal.
$g$	- Aceleração local da gravidade	m/s <sup>2</sup>
$h$	- Entalpia	kcal/kg
$\dot{m}$	- Vazão massica	kg/h
$P$	- Pressão	kg/cm <sup>2</sup> a
$Q_a$	- Calor a ser removido do Absorvedor	kcal/h
$Q_c$	- Calor a ser removido do Evaporador ou Carga térmica de refrigeração	kcal/h
$Q_g$	- Calor a ser fornecido ao Gerador	kcal/h
$\dot{Q}_{vc}$	- Calor trocado pelo volume de controle	kcal/h
$t$	- Temperatura	°C
$v$	- Volume específico	m <sup>3</sup> /kg
$V$	- Velocidade	m/h
$w_a$	- Vazão do licor fraco	kg/h
$w_b$	- Vazão do licor forte	kg/h
$w_d$	- Vazão do refrigerante	kg/h
$x_a$	- Concentração da amônia no licor fraco ou concentração do brometo de lítio no licor fraco	kg/kg
$x_b$	- Concentração de amônia no licor forte ou concentração do brometo de lítio no licor forte	kg/kg

$x_d$	- Concentração de amônia no refrigerante ou concentração do brometo de lítio no refrigerante	kg/kg
$z$	- Cota do ponto considerado	m
$\beta$	- Coeficiente de desempenho	
$\Delta H_1$	- Variação de entalpia dos fluidos no trocador de calor dos licores	kcal/h
$\Delta H_p$	- Calor trocado no pré-resfriador	kcal/h
$\Delta H_s$	- Calor trocado na serpentina superior do gerador	kcal/h
$e$	- Índice que indica condição de um determinado parâmetro na entrada do volume de controle	
$s$	- Índice que indica condição de um determinado parâmetro na saída do volume de controle	

## 1. Introdução

### 1.1 - Objetivo do estudo

Pretende-se estudar neste trabalho os diversos ciclos de refrigeração por absorção, quanto aos seguintes itens:

- Análise da variação dos parâmetros com relação ao coeficiente de desempenho e calor trocado nos equipamentos.
- Aplicação e fontes energética.

Para tanto, torna-se necessário estudar os seguintes itens: tipos de ciclos de absorção e a comparação entre cada um deles, tipos e requisitos básicos do par absorvente - refrigerante, as equações básicas dos ciclos no intervalo de variações dos parâmetros e o comportamento da variação dos parâmetros no coeficiente de desempenho do ciclo e no calor trocado nos equipamentos. A análise do comportamento é obtida através do desenvolvimento dos cálculos, para cada um dos tipos de ciclo de absorção, tendo em vista a complexidade de uma análise teórica. É então feita a comparação entre os ciclos de refrigeração por absorção, que empregam o par amônia e água e o par água e brometo de lítio, quanto às vantagens de cada um destes e os seus campos de aplicação. Por último são mostradas quais as fontes energéticas mais aplicáveis em cada ciclo.

## 1.2 - Ciclo de refrigeração de compressão de vapor.

Os ciclos de refrigeração de compressão de vapor, são os mais comumente empregados. Eles podem utilizar diversos tipos de fluidos refrigerantes, os quais mudam de fase no ciclo. Vide figura 1. [7], [8], [9] e [13].

Este ciclo opera com o vapor de refrigerante (ponto 1), tendo inicialmente a sua pressão elevada por um compressor, pressão esta correspondente à temperatura de saturação no condensador. O vapor do refrigerante à alta pressão e com um certo grau de superaquecimento, é resfriado até à temperatura de saturação e daí liquefeito no condensador, através da remoção de calor feita através do ar ou de água de resfriamento ou ainda por outro fluido ( ponto 3 ). O refrigerante líquido, que pode até estar subresfriado, é expandido isoentalpicamente através de uma valvula de expansão ( ponto 4 ), até a pressão correspondente a da temperatura de saturação do fluido refrigerante que é menor ou igual ao do meio o qual se deseja resfriar. O refrigerante então à baixa pressão e com duas fases, líquida e vapor, é enviado ao evaporador, onde o líquido é evaporado ( ponto 4 ) através do fornecimento de calor do meio que será resfriado: ar, ou água formando gelo, ou outro fluido.

Os principais parâmetros que determinam a escolha do tipo de refrigerante são a pressão de vapor na temperatura do condensador, a pressão de vapor na temperatura do evaporador e o calor latente de vaporização na temperatura do evaporador. Se o refrigerante tiver elevadas pressões de vapor, isto significará equipamentos de dimensões reduzidas, mas

com grandes espessuras de parede. Refrigerantes com baixas pressões de vapor implicam em grandes volumes específicos, significando equipamentos de grandes dimensões.

### 1.3 - Ciclos de refrigeração de absorção básicos

#### 1.3.1 - Contínuo

Os ciclos de absorção diferem dos de compressão de vapor pela redução da potência dispendida, visto que ao invés de se empregar um compressor para elevar a pressão, se utiliza uma bomba que dispende menor potência já que o volume específico do líquido é menor que o do vapor. Vide figura 2.

Os ciclos de absorção utilizam dois fluidos, o refrigerante e o absorvente. Conforme a concentração do refrigerante, na solução refrigerante absorvente, é denominado de uma forma diferente. A solução com uma maior concentração de refrigerante, é chamada licor forte, e a solução com menor concentração de refrigerante, é chamada de licor fraco.

O ciclo básico contínuo, opera com o gerador recebendo calor de uma fonte quente que é utilizada para separar o refrigerante do licor forte (ponto 7), obtendo-se assim, o vapor do refrigerante que é enviado ao condensador (ponto 8), e o licor fraco (ponto 1), que vai para o fundo do gerador. O vapor do refrigerante segue então ao condensador, onde é liquefeito, através da remoção de calor por ar ou água de resfriamento. O refrigerante, na forma líquida (ponto 9), passa por uma válvula de expansão, cuja finalidade é reduzir a sua pressão isoentalpicamente, ficando o refrigerante com duas fases, gasosa e líquida (ponto 11). O refrigerante nesta condição, dirige-se ao evaporador, onde a fração líquida do re-

refrigerante é evaporada, através do fornecimento de calor extraído do ambiente que se deseja resfriar. O vapor do refrigerante (ponto 12), segue então para o absorvedor, onde é absorvido pelo absorvente, formando o licor forte. Como a reação de absorção é exotérmica, o calor deve ser removido pela água de resfriamento ou pelo ar para que se mantenha constante a temperatura do absorvedor.

O licor forte (ponto 4) é bombeado do absorvedor ao gerador, passando por um trocador de calor em contra-corrente com o licor fraco (ponto 1) que por sua vez é resfriado.

A figura 2 mostra o ciclo A que representa o ciclo básico de absorção amônia e água, e também o ciclo F que representa o ciclo básico de absorção água e brometo de lítio. As figuras 3,4,5 e 6 mostram os ciclos B,C,D e E, respectivamente, que representam ciclos de absorção amônia e água. A fim de facilitar a comparação entre os mesmos pontos, entre os diversos ciclos. foi usada a mesma numeração. Assim seja, há ciclos que a numeração não é sequencial. [1],[7],[8]e[9].

### 1.3.2 - "Platen -Munters" contínuo.

O ciclo básico de absorção tipo "Platen-Munters", difere do ciclo básico porque não emprega energia elétrica, ou seja, não necessita de uma bomba. Para tanto, utiliza um terceiro fluido para balancear as pressões no ciclo que trabalha sobre uma mesma pressão total. Vide figura 7. [3]e[13].

O gerador recebe calor de uma fonte quente elevando a temperatura do licor forte até a sua vaporização. As bolhas do vapor do refrigerante arrastam o licor fraco, por percola

ção, até o retificador (separador). Este tem a função de separar o vapor do refrigerante, do licor fraco, o qual flui de volta para o absorvedor, via um trocador de calor, dos licores que será descrito, a seguir. O vapor do refrigerante (ponto 6) segue até o condensador, onde é liquefeito através da remoção de calor pelo ar ou água de resfriamento. O refrigerante líquido vai para o evaporador, onde entra em contato com o terceiro fluido, como por exemplo hidrogênio, provocando a redução da pressão parcial do refrigerante, seguindo a Lei de Dalton. Segundo esta lei, a pressão total de uma mistura de gases é igual a soma parcial das pressões de cada gás que compõe a mistura. A parte que permanece ainda líquida do refrigerante, após a redução de pressão, é evaporada através do fornecimento de calor extraído do ambiente, o qual se deseja resfriar. O vapor do refrigerante e o hidrogênio (ponto 8), seguem então para o absorvedor. Neste, o hidrogênio se separa do refrigerante e do licor, por ser insolúvel e por se manter na fase gasosa, indo então de volta ao evaporador (ponto 9). O refrigerante no absorvedor é absorvido no licor fraco, formando o licor forte. Como esta reação é exotérmica, o calor é removido pela água de resfriamento ou pelo ar, para manter baixa a temperatura do absorvedor. O licor forte (ponto 3) segue então para o gerador via um trocador de calor, em contra corrente com o licor fraco (ponto 1), que é resfriado. Este fluxo ocorre nesta direção devido a existência de coluna hidrostática entre o absorvedor e o gerador.

### 1.3.3 - Intermitente

No ciclo de absorção intermitente, o absorvedor, o gerador, o condensador e o evaporador operam combinados. Neste ciclo, durante o período de resfriamento, o refrigerante é removido pelo absorvente, que pode ser água, sílica gel, cal ativada ou cloretos alcalinos ferrosos.

Quando o absorvente está saturado, ele é regenerado - pelo aquecimento, e os vapores removidos serão condensados - no condensador, resfriado pela água de resfriamento. O líquido, que é acumulado em um reservatório, é expandido através de uma válvula de expansão, indo ao evaporador, onde ele é evaporado, extraíndo calor do meio que será resfriado.

Estes ciclos não têm tido muito sucesso por duas razões: a preferência de uma refrigeração contínua é maior e por ser um grande risco de explosão devido ao superaquecimento durante a regeneração. [3] e [13].

### 1.3.4 - Ciclos de efeito duplo.

Estes ciclos operam com temperaturas mais elevadas - que os de efeito simples, gerando praticamente o dobro de vazão de refrigerante por unidade de calor formado ou gerado. Proporcionando assim uma eficiência maior que o ciclo de - efeito simples. O refrigerante superaquecido evaporado no - primeiro estágio do gerador passa ao segundo estágio, onde é

condensado, gerando mais refrigerante. O restante do processo é similar ao de efeito simples. São utilizados dois trocadores de calor dos licores para pré-aquecer o licor forte e aumentar a eficiência do ciclo.

O par refrigerante-absorvente empregado nestes ciclos é água e brometo de lítio, porque o par amônia e água requer uma pressão muito mais elevada no primeiro estágio do gerador, assim como também um maior trabalho de bombeamento, devido à diferença de pressões ser alta entre o absorvedor e o gerador.

### 1.3.5 - Ciclo real de absorção completo.

Os ciclos de absorção apresentados nos capítulos anteriores foram simplificados para facilitar a sua compreensão. O ciclo real de absorção completo tem equipamentos adicionais, os quais são descritos a seguir [4],[8] e [9]:

- . Vaso acumulador - tem por finalidade armazenar o refrigerante líquido que sai do condensador;

- . Pré-resfriador de líquido - para aumentar o coeficiente de desempenho, há ciclos que o utilizam para pré-resfriar o refrigerante antes do evaporador. A variação entálpica é produzida pelo vapor do refrigerante que sai do evaporador;

- . Unidade de purga - é utilizada para remover os gases não condensáveis dos equipamentos. A presença destes gases em pequena quantidade, aumenta a pressão total, influenciando decisivamente no ciclo trocado tanto no condensador, como no evaporador;

- . Analizador - pode ser utilizado nos ciclos de absorção de amônia e água. Durante o processo de aquecimento no gerador, os vapores de amônia e um pouco do vapor de água são removidos do licor forte. Os vapores se dirigem ao analisador que está localizado no topo do gerador. O analisador é basicamente uma torre de fracionamento. A medida que os vapores ascendem ao analisador, eles se resfriam. Os vapores de água então se condensam, e retornam ao gerador. Os vapores -

de amônia continuam a ascender até sair pelo topo do analisador, fluindo para o condensador. A água condensada absorve um pouco de amônia quando desce através do analisador. Portanto o condensado retorna ao gerador na forma de licor fraco.

. Retificador - este equipamento pode ser utilizado nos ciclos de absorção de amônia e água, para reduzir ainda mais a quantidade de água que é conduzida ao condensador. O retificador é, na verdade, um pré-condensador da água. Ele não tem capacidade para condensar quantidade apreciável de amônia, mas proporciona condensação do vapor de água remanescente no gás proveniente do analisador. Esta água é retornada ao analisador através de uma linha de purga, na forma de licor fraco chamado refluxo.

Fig.1 - Ciclo de Refrigeração de Compressão de Vapor

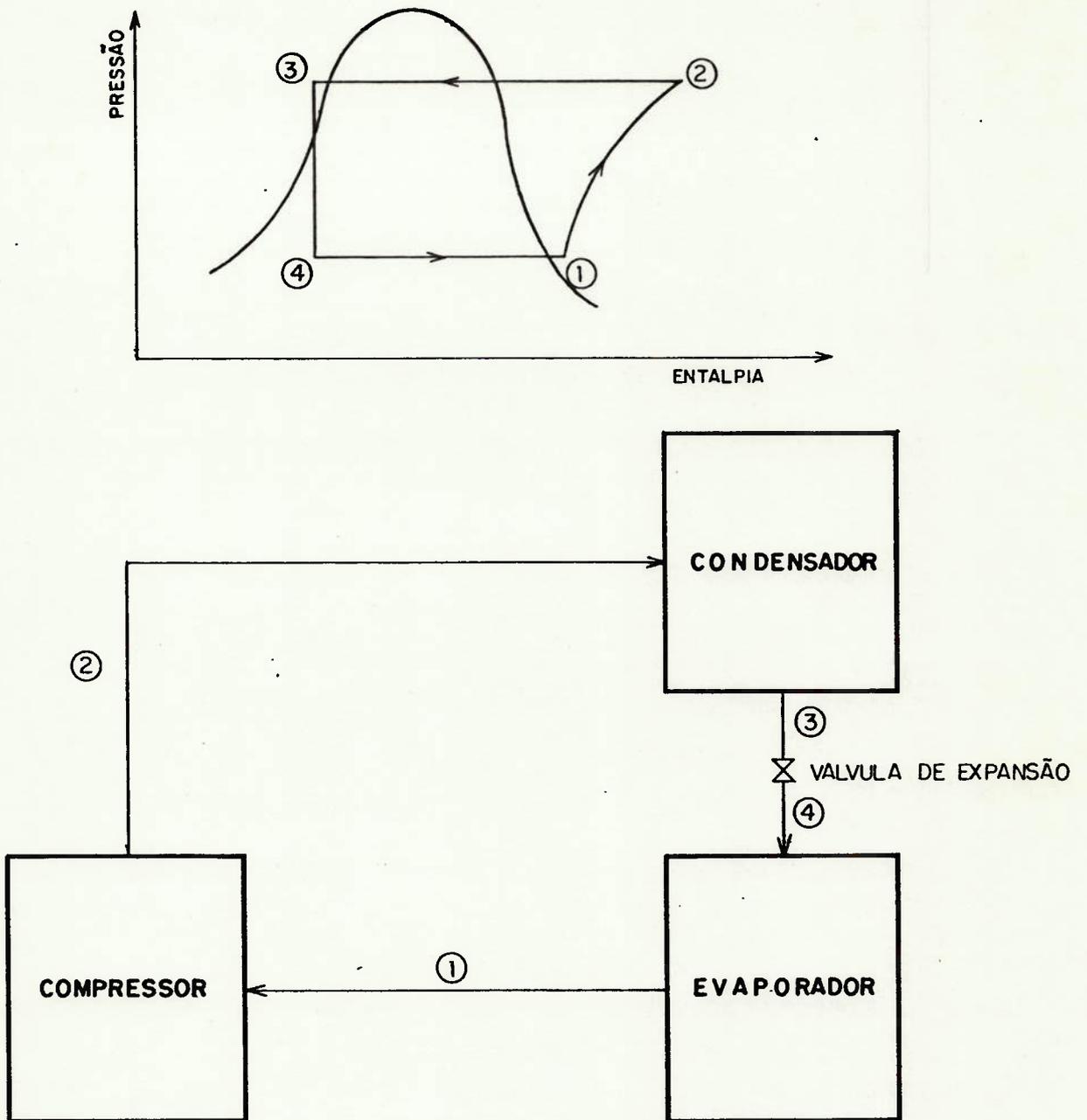


Fig.2 - CICLO A - Ciclo Básico de Absorção Amônia e Água  
 CICLO F - Ciclo Básico de Absorção Água e Brometo de Lítio.

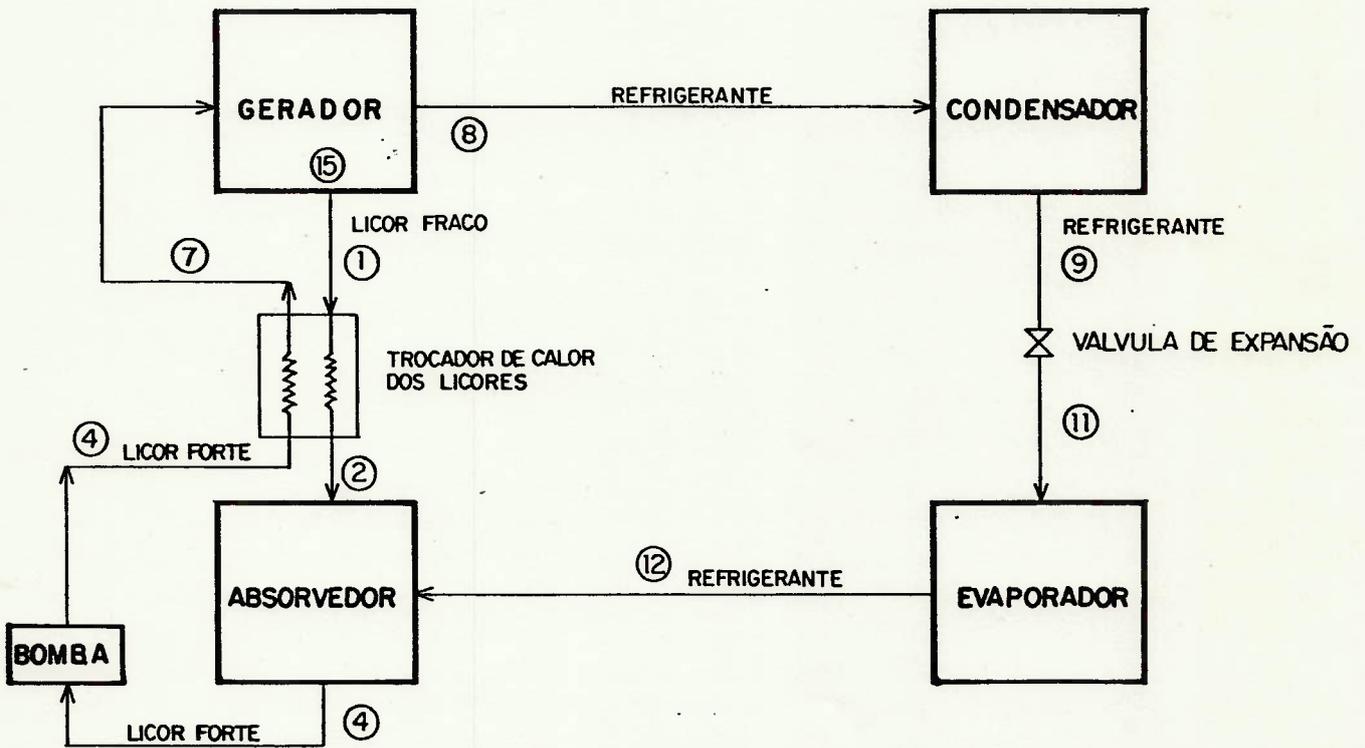
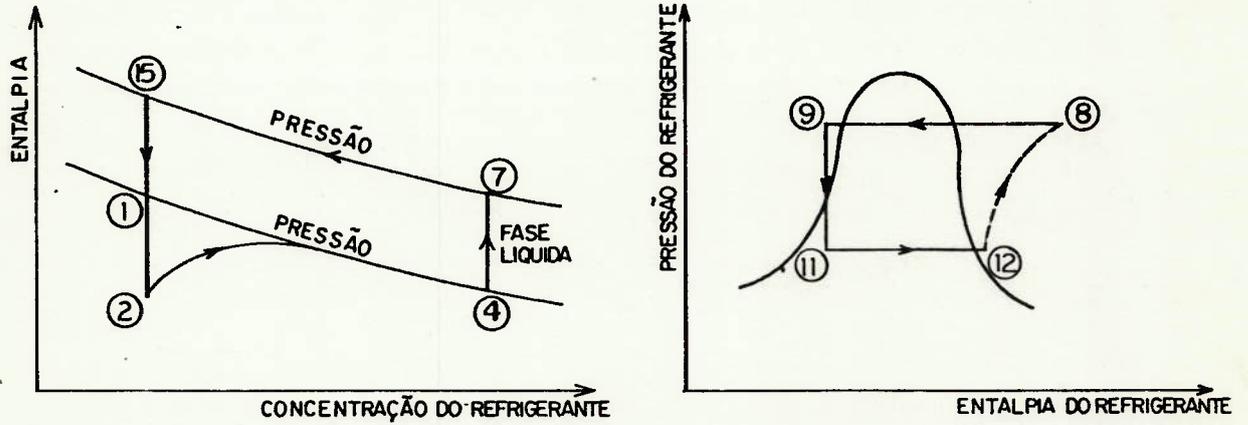


Fig.3 - CICLO B - Ciclo Completo de Absorção Amônia e Água

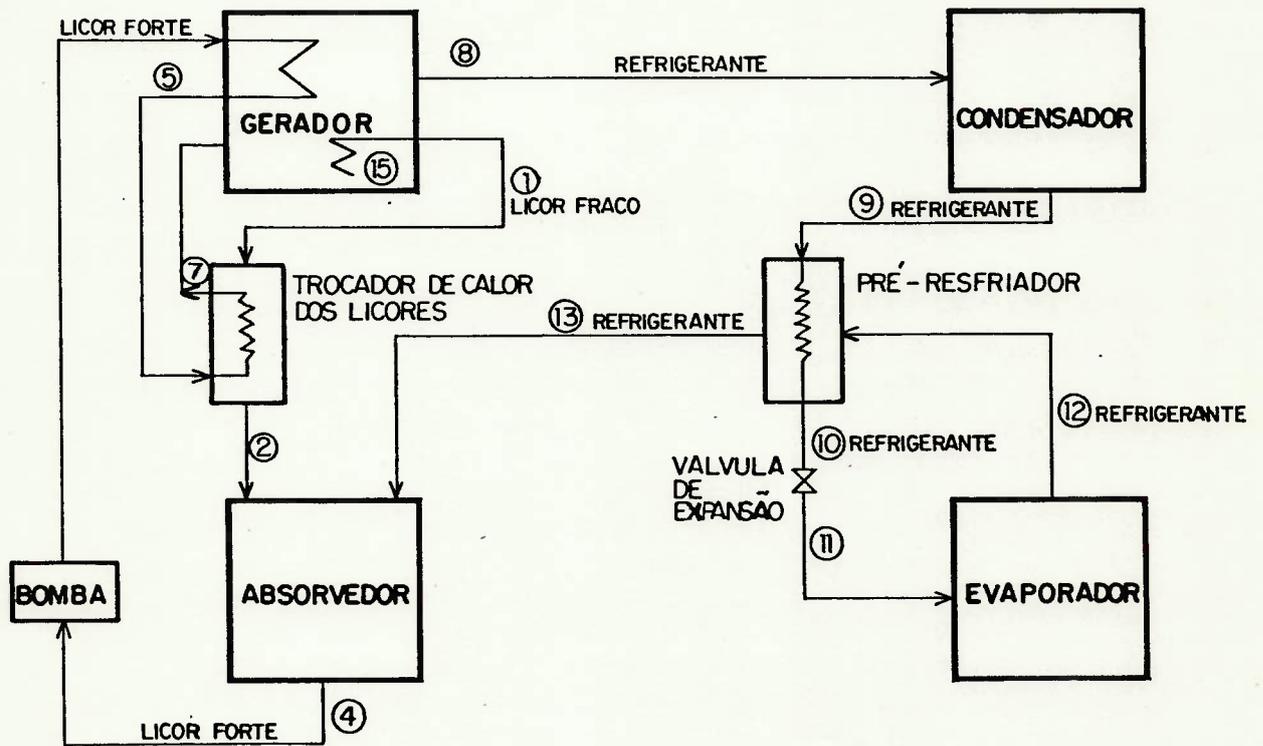


Fig.4 - CICLO C - Ciclo Completo de Absorção Amônia e Água sem o Pré-Resfriador.

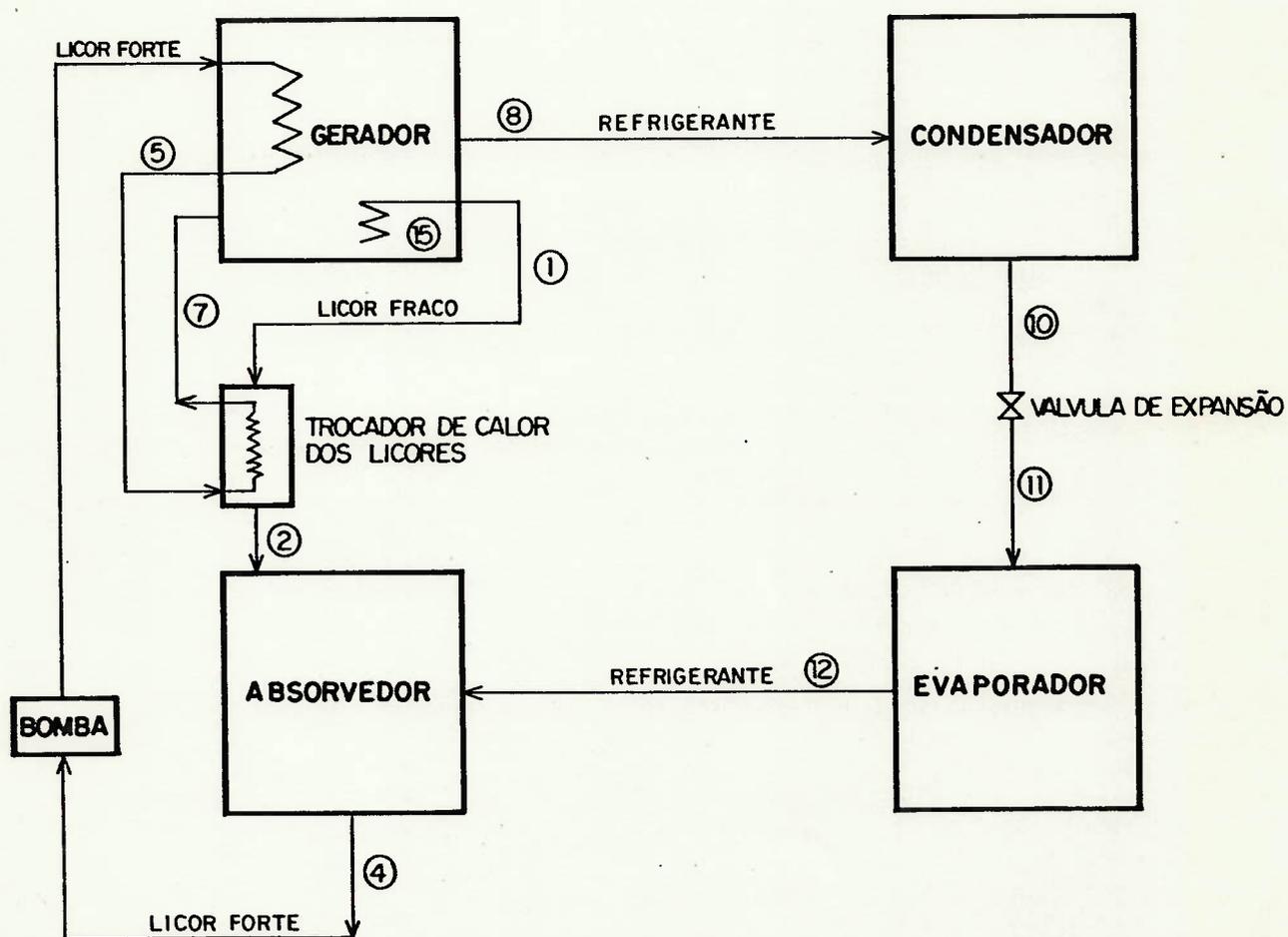


Fig.5 - CICLO D - Ciclo Completo de Absorção Amônia e Água sem o Pré-Resfriador e a Serpentina de Fundo do Gerador.

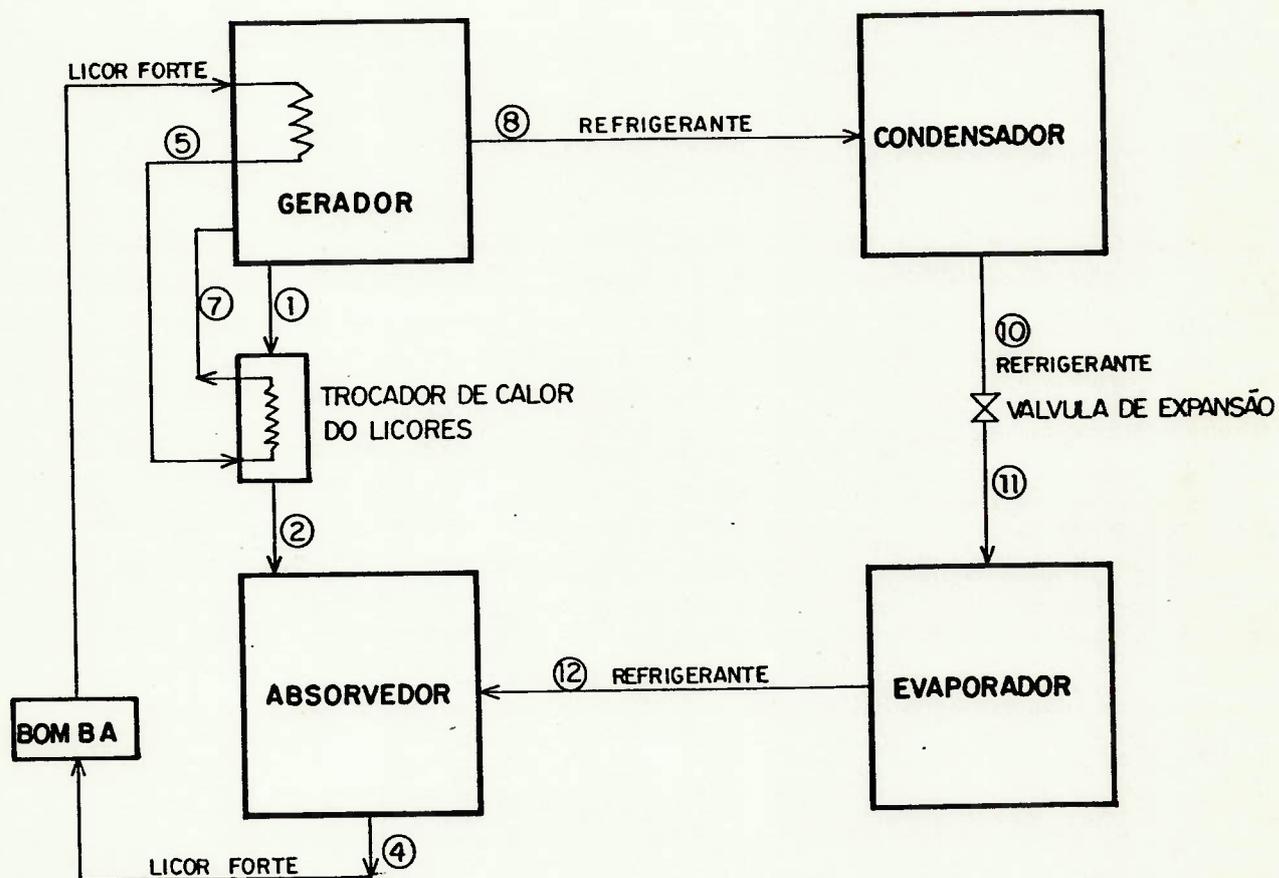


Fig.6- Ciclo E - Ciclo Completo de Absorção Amônia e Água sem o pré-resfriador, sem serpentina de fundo e superior do gerador e sem o trocador de calor dos licores.

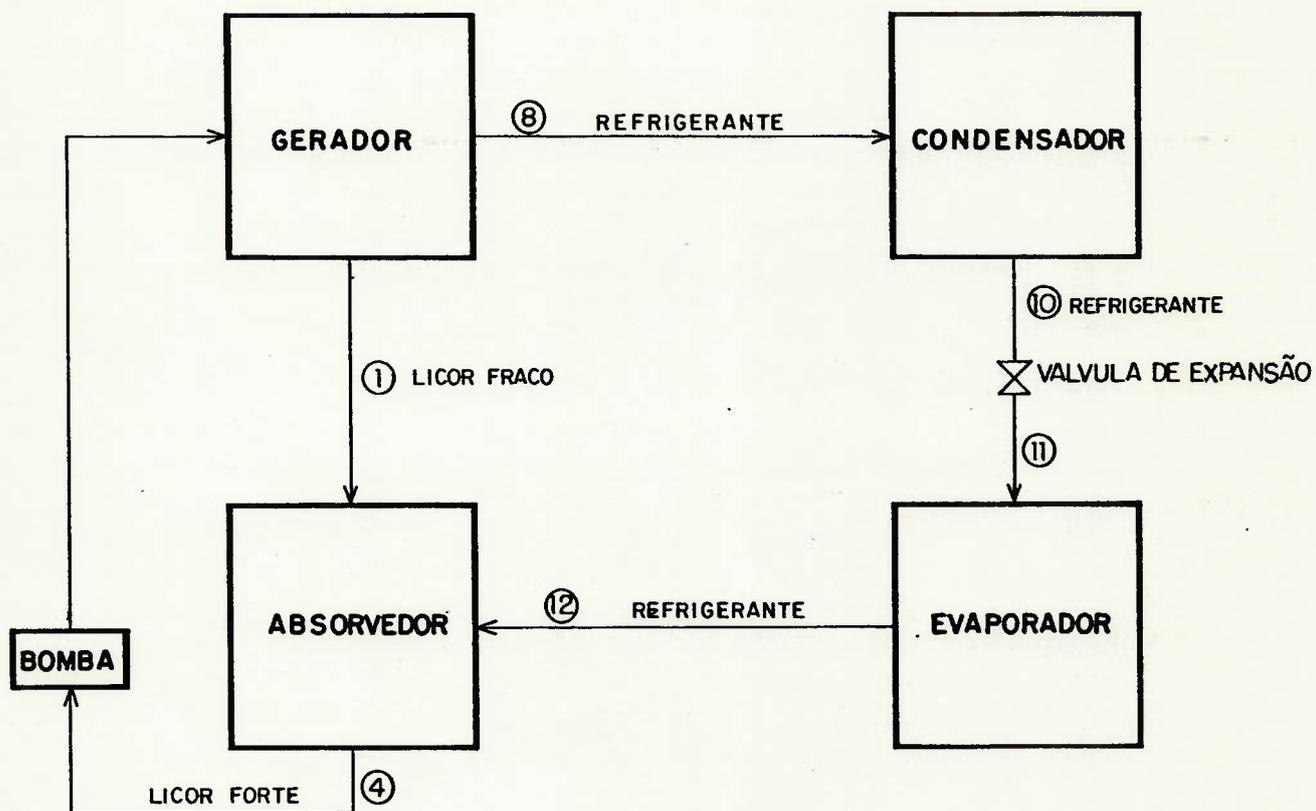


Fig.7 - Ciclo de Absorção "Platen - Munters" contínuo.

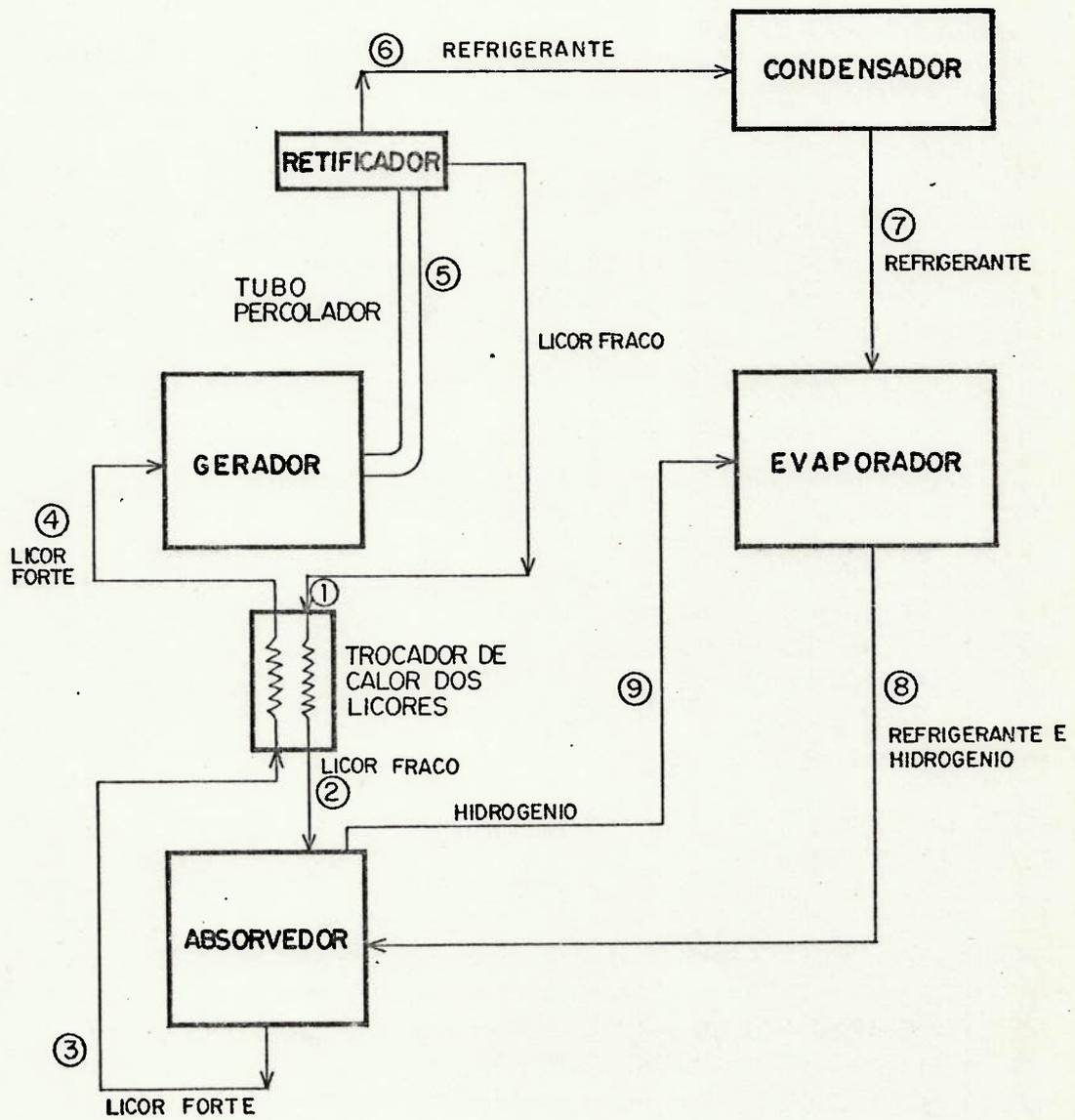
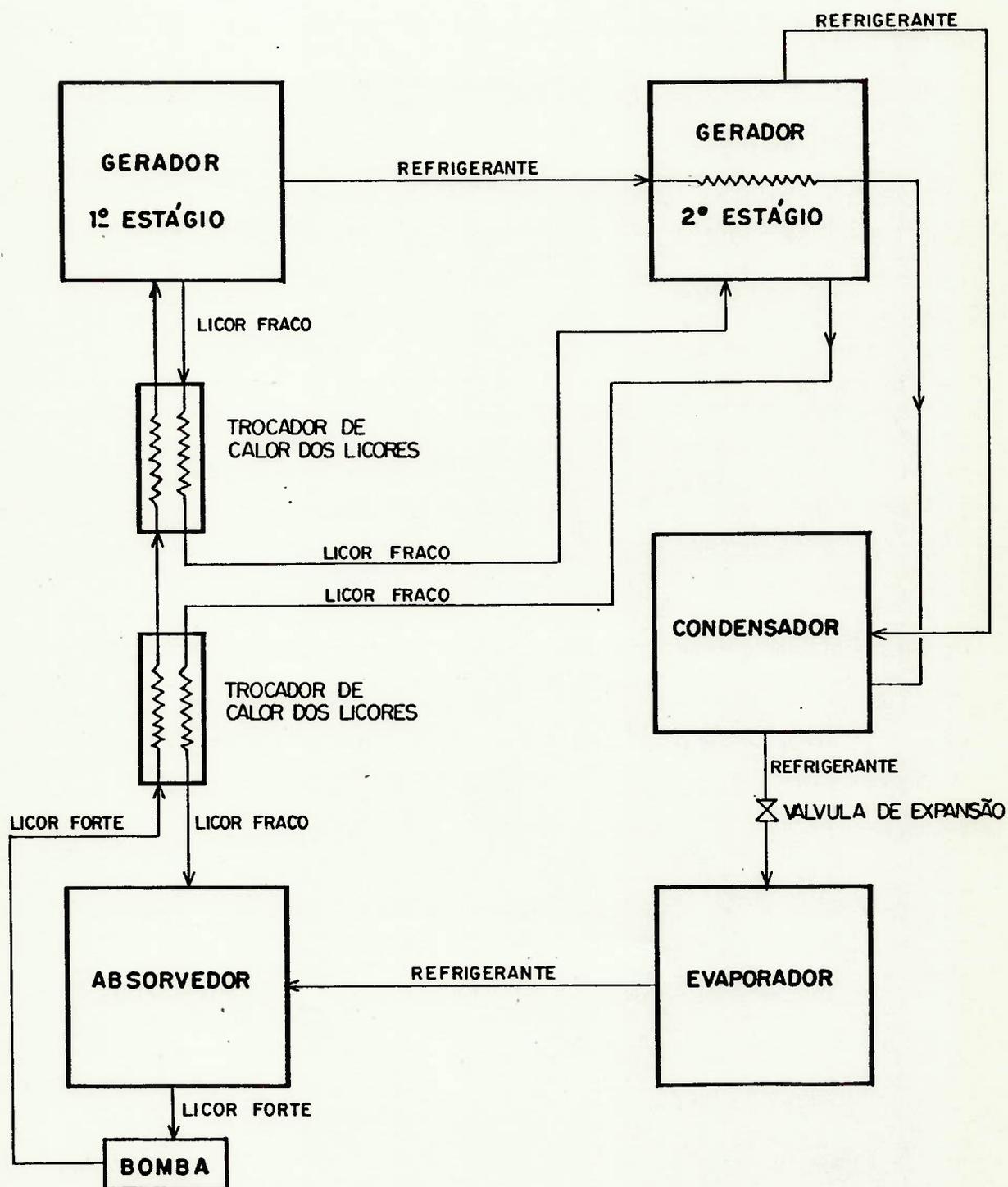


Fig.8 - Ciclo de Absorção de Efeito Duplo



#### 1.4 - Tipos e requisitos básicos do par absorvente-refrigerante.

O par absorvente-refrigerante que opera em ciclos de refrigerante por absorção, deve atender a uma série de requisitos básicos, para que formem uma combinação ideal. Entre estes requisitos podemos citar:

##### 1.4.1 - Pressão do refrigerante.

O valor da pressão de operação deve ser de uma grandeza tal que, os equipamentos não sejam de grandes dimensões e que não tenham que ter paredes espessas.

##### 1.4.2 - Calor latente do refrigerante.

A vazão de refrigerante, é determinada pela carga térmica a ser extraída do meio que se deseja resfriar e também pelo calor latente do refrigerante. Quanto maior for este, menor será a vazão circulante de refrigerante e consequentemente serão menores as vazões dos licores forte e fraco.

##### 1.4.3 - Estabilidade

É necessário que o par tenha estabilidade química e física em toda a faixa operacional do ciclo.

#### 1.4.4 - Viscosidade

A viscosidade deve ser de uma grandeza tal que, seja baixa o suficiente para não se ter problemas de transferência do fluido, e por outro lado alta o suficiente para proporcionar boa transferência de calor.

#### 1.4.5 - Ausência da fase sólida.

É necessário que não haja risco da formação da fase sólida devido à cristalização nas condições de operação de pressão e temperatura do ciclo. É importante a escolha da concentração de licor forte para evitar a cristalização.

#### 1.4.6 - Grau de volatilidade.

O refrigerante deve ser muito mais volátil que o absorvente, possibilitando que os dois possam ser facilmente separados no gerador. De outra forma, o custo do gerador e a necessidade de calor para separação seriam grandes.

#### 1.4.7 - Afinidade.

É mais comumente desejável que o absorvente tenha uma maior afinidade com o refrigerante, sob condições nas quais a absorção existe. Esta afinidade causa um desvio negativo da lei de Raoult, e resulta em um coeficiente de atividade menor

que a unidade, para o refrigerante; ela reduz a quantidade de absorvente a ser circulada, e conseqüentemente, o desperdício de energia térmica devido também aos efeitos do calor - sensível, as dimensões do trocador de calor dos licores, é reduzida. Há indicações que uma grande afinidade apresenta - desvantagens, porque ela está associada a um grande calor de diluição, conseqüentemente, calor extra é requerido no gerador para separar o refrigerante do absorvente.

#### 1:4.8 - Segurança.

Dependendo da aplicação a ser dada ao ciclo de refrigeração por absorção, o par refrigerante-absorvente não deverá ser tóxico e inflamável.

#### 1.4.9 - Corrosão

É necessário que tanto o refrigerante, como o absorvente, assim como a combinação de ambos, não provoquem corrosão nos materiais empregados na construção do ciclo.

Os tipos de pares mais utilizados como refrigerantes e absorventes nestes ciclos, são os seguintes:

- amônia e água
- água e brometo de lítio
- água e cloreto de lítio
- cloreto de metileno e dimetil éter de tetraetileno glicol

- amônia e nitrato de lítio.

Também tem sido estudado a solução de tiocianeto de sódio.

Os pares mais utilizados têm sido a amônia e a água e a água e o brometo de lítio, porque os demais pares em comparação com estes podem apresentar problemas de estabilidade e corrosão. Também os refrigerantes, exceto os fluoríferantes são um tanto tóxicos [11].

## 2. Cálculo dos Ciclos de Absorção.

### 2.1 - Equações Básicas.

O Primeiro Princípio da Termodinâmica para um sistema, percorrendo um ciclo, é dado pela seguinte equação:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad (1)$$

O Primeiro Princípio da Termodinâmica para um volume - de controle, é dada pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{v_e^2}{2} + g Z_e \right) &= \frac{dE_{v.c.}}{dt} + \sum \dot{m}_s \left( h_s + \frac{v_s^2}{2} + \right. \\ &\left. + g Z_s \right) + W_{v.c.} \end{aligned} \quad (2)$$

A equação da continuidade para um volume de controle em regime - permanente é:

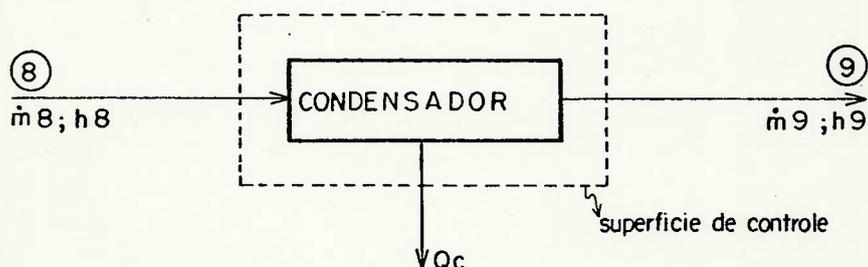
$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (3)$$

O Primeiro Princípio da Termodinâmica para um Volume de controle em regime permanente, é dada pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{v_e^2}{2} + g Z_e \right) = \sum \dot{m}_s \left( h_s + \frac{v_s^2}{2} + g Z_s \right) + W_{vc} \quad (4)$$

Inicialmente, será desprezada a variação da energia potencial e a variação da energia cinética. E será utilizada a seguinte convenção de sinais: Calor que entra no volume de controle é positivo, calor que sai do volume de controle é negativo, e inversamente para o trabalho. Nos itens seguintes a equação do primeiro princípio da termodinâmica e da continuidade, serão aplicadas ao ciclo de refrigeração por absorção.

2.1.1 - Aplicando-se a equação 4 ao condensador, tem-se:



$$Q_c + \dot{m}_8 (h_8) = \dot{m}_9 (h_9)$$

Pela equação (3):

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{w}_d$$

$$Q_c = \dot{w}_d (h_9 - h_8) \quad (5)$$

2.1.2 - Aplicando-se a equação (4) ao evaporador, tem-se:

se:



$$Q_e + \dot{m}_{11} h_{11} = \dot{m}_{12} h_{12}$$

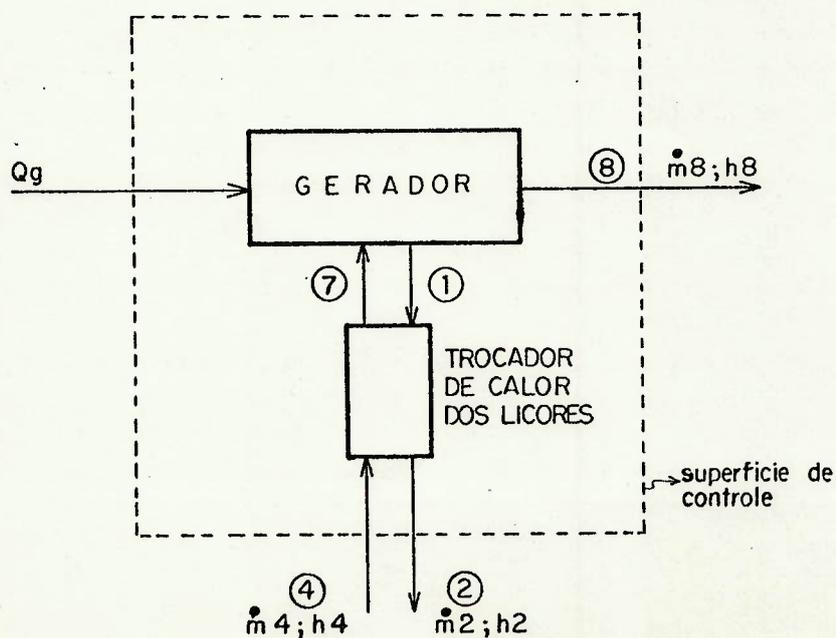
Pela equação (3):

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} = w_d$$

$$Q_e = w_d (h_{12} - h_{11})$$

$$w_d = \frac{Q_e}{(h_{12} - h_{11})} \quad (6)$$

2.1.3 - Aplicando-se a equação (4) ao conjunto gerador e trocador de calor dos licores, tem-se:



$$Q_g + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_2 h_2$$

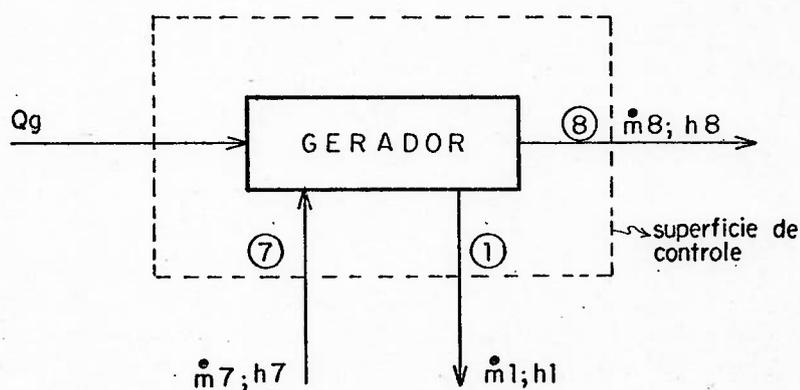
onde  $\dot{m}_4 = w_b$

$$\dot{m}_8 = w_d$$

$$\dot{m}_2 = w_a$$

$$Q_g = w_a h_2 + w_d h_8 - w_b h_4 \quad (7)$$

2.1.4 - Aplicando-se a equação (4) ao gerador, tem-se:



$$Q_g + \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_1 h_1$$

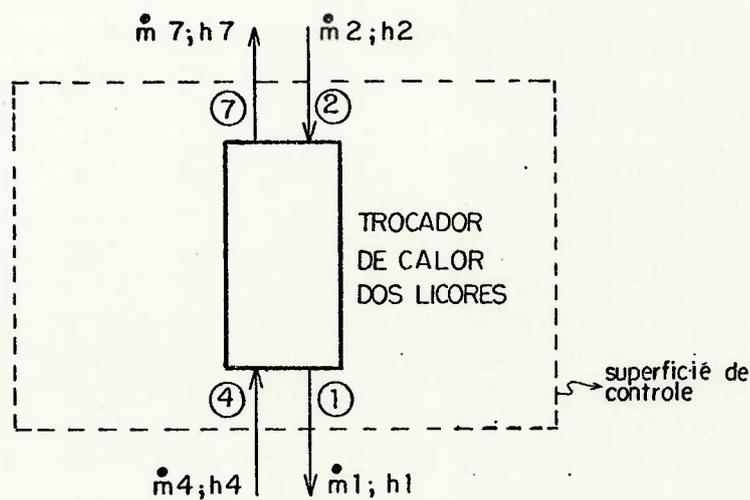
onde:  $\dot{m}_8 = w_d$

$$\dot{m}_7 = w_b$$

$$\dot{m}_1 = w_a$$

$$Q_g = w_a h_1 + w_d h_8 - w_b h_7 \quad (8)$$

2.1.5 - Aplicando-se a equação (4) ao trocador de calor dos licores, no ciclo A e F, tem-se:



$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_1 h_1$$

onde:  $\dot{m}_7 = \dot{m}_4 = w_b$

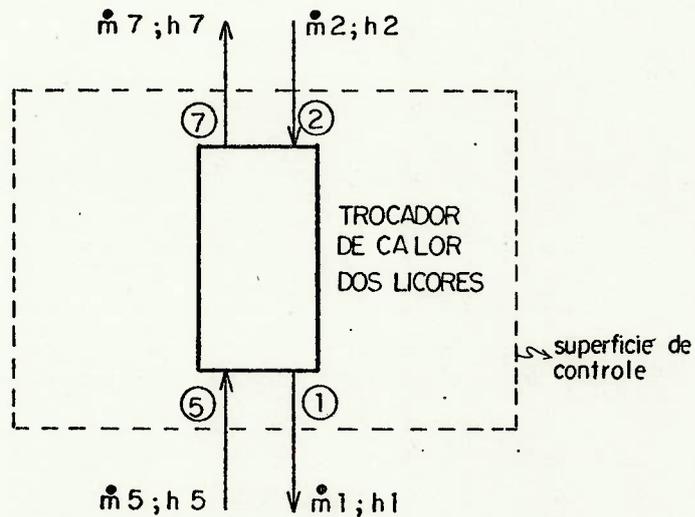
$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = w_a$$

$$w_a h_2 + w_b h_4 - w_b h_7 - w_a h_1 = 0$$

$$w_b (h_7 - h_4) + w_a (h_1 - h_2) = 0$$

$$h_7 = (h_1 - h_2) \frac{w_a}{w_b} + h_4 \quad (9)$$

2.1.6 - Aplicando-se a equação 4 ao trocador de calor dos licores, nos ciclos B, C e D, tem-se:



$$\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_7 h_7$$

onde:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_5 = w_b$$

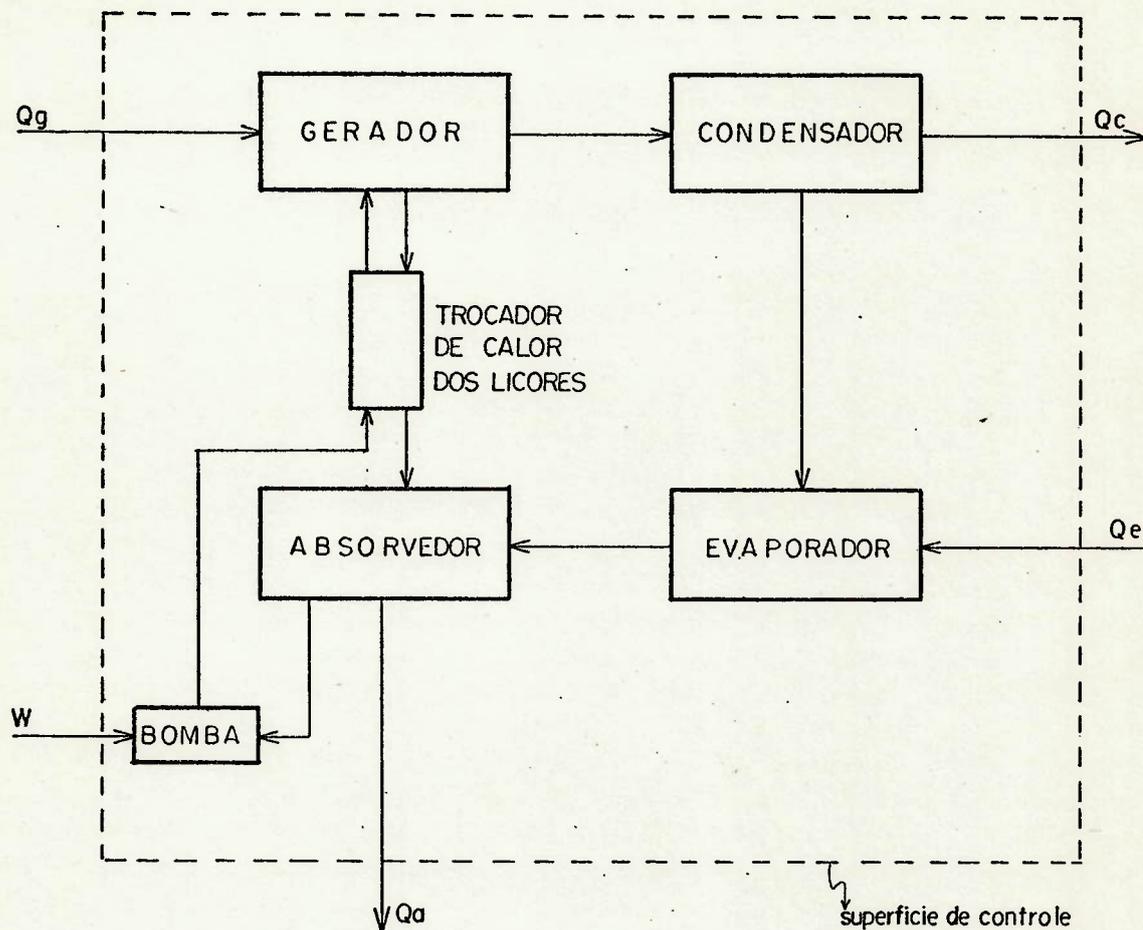
$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = w_a$$

$$w_b h_5 + w_a h_2 - w_a h_1 - w_b h_7 = 0$$

$$w_b (h_7 - h_5) + w_a (h_1 - h_2) = 0$$

$$h_7 = (h_1 - h_2) \frac{w_a}{w_b} + h_5 \quad (10)$$

2.1.7 - Aplicando-se a equação 1 ao ciclo, tem-se:



Pela equação 1

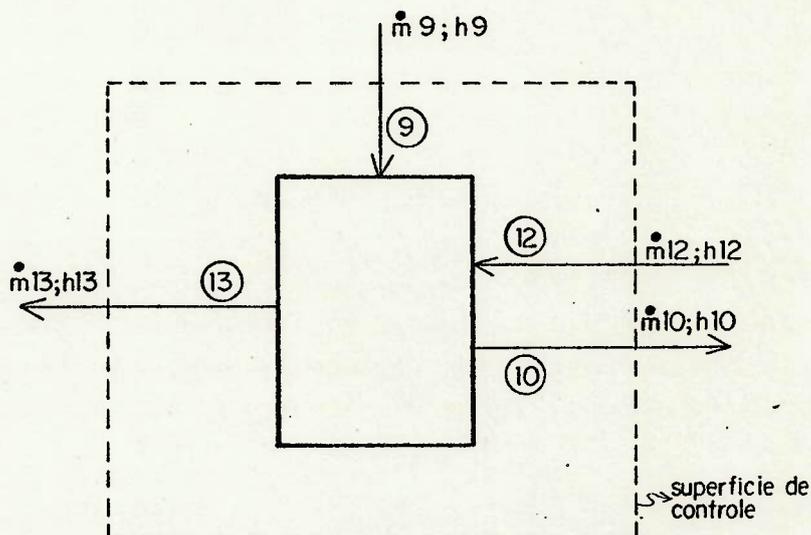
$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$

$$\Sigma Q = \Sigma W$$

$$Q_g + Q_e + Q_a + Q_c = W$$

$$- Q_a = -W + Q_c + Q_g + Q_e \quad (11)$$

2.1.8 - Aplicando-se a equação 4 ao pré-resfriador, tem-se:



$$\dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{12} h_{12} = \dot{m}_{13} h_{13} + \dot{m}_{10} h_{10}$$

onde:

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} = \dot{w}_d$$

$$\dot{w}_d h_9 + \dot{w}_d h_{12} = \dot{w}_d h_{13} + \dot{w}_d h_{10}$$

$$h_{13} = h_{12} + h_9 - h_{10} \quad (12)$$

2.1.9 - Expressões das grandezas características.

O parâmetro para avaliar o desempenho, em sistemas de refrigeração, é definido como coeficiente de desempenho,  $\beta$

$$\beta = \frac{\text{efeito frigorífico}}{\text{trabalho fornecido} + \text{Calor fornecido}} = \frac{Q_e}{Q_g + |W|} \quad (13)$$

Cálculo básico para um ciclo de refrigeração - por absorção do tipo "A". [1] e [2].

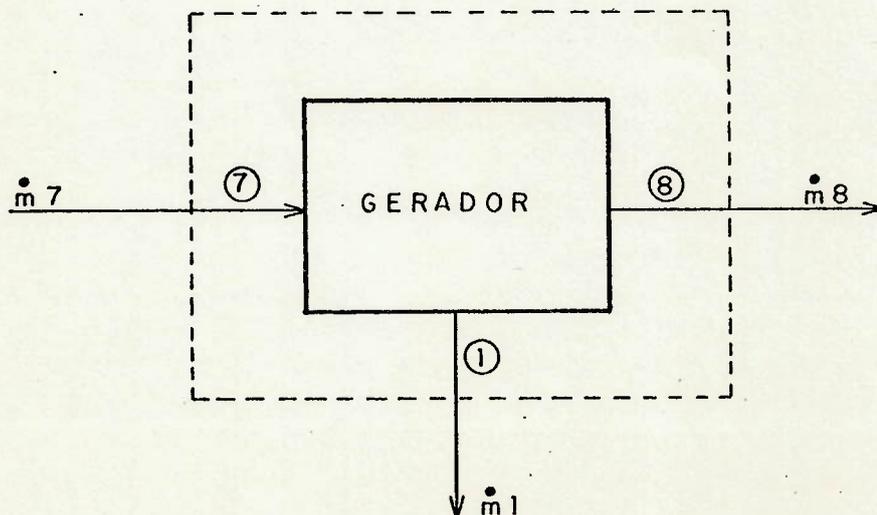
Para o cálculo da vazão de refrigeração emprega-se a equação 6.

$$w_d = \frac{Q_e}{(h_{12} - h_{11})}$$

A determinação da concentração do licor forte ( $x_a$ ) é feita a partir da pressão e temperatura no ponto 4, através de gráficos (35 ou 36). A concentração do licor fraco ( $x_b$ ) é calculada a partir da concentração do licor forte ( $x_a$ ), diminuída da diferença de concentrações entre os licores ( $\Delta x$ ) admitida.

$$x_a - x_b = \Delta x\%$$

Cálculo das vazões relativas é realizado com base no balanço de massa no gerador



sendo:

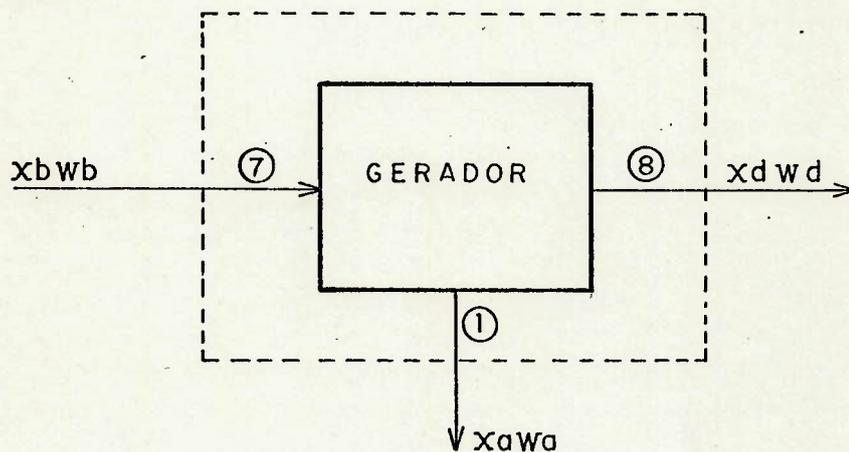
$$\dot{m}_7 = w_b$$

$$\dot{m}_8 = w_d$$

$$\dot{m}_1 = w_a$$

$$w_b = w_d + w_a \quad (14)$$

Fazendo-se o balanço de massa para a amônia, -  
tem-se:



$$x_b w_b = x_d w_d + x_a w_a$$

com a equação (14) tem-se:

$$x_b (w_d + w_a) = x_d w_d + x_a w_a$$

$$x_b w_d + x_b w_a = x_d w_d + x_a w_a$$

$$w_a (x_b - x_a) = w_d (x_d - x_b)$$

$$\frac{w_a}{w_d} = \frac{(x_d - x_b)}{(x_b - x_a)} \quad (15)$$

Como

$$w_b = w_a + w_d \quad (14)$$

tem-se:

$$\frac{w_b}{w_d} = \frac{w_a}{w_d} + \frac{w_d}{w_d}$$

$$\frac{w_b}{w_d} = \frac{w_a}{w_d} + 1$$

As vazões dos licores fraco e forte é calculada com base na vazão de refrigerante

$$w_a = \left( \frac{w_a}{w_d} \right) \cdot w_d$$

$$w_b = \left( \frac{w_b}{w_d} \right) \cdot w_d$$

A temperatura e entalpia do fundo do gerador é obtida através da sua pressão e concentração.

A entalpia do ponto 2 é obtida através da equação (17) que determina rendimento do trocador de calor dos licores,

$$\eta = \frac{h_7 - h_4}{h_1 - h_4} \quad (16)$$

Substituindo-se a equação (9) na (16) tem-se:

$$\eta = \frac{(h_1 - h_2) \frac{w_a}{w_b} + h_4 - h_4}{h_1 - h_4}$$

$$\eta = \frac{(h_1 - h_2) \frac{w_a}{w_b}}{(h_1 - h_4)} \quad (17)$$

A temperatura do ponto 2 é calculada à partir - da concentração e entalpia neste ponto, através de gráfico,  $x = x(h)$ .

O cálculo da entalpia do ponto 7, é feito à partir da equação (16)

$$h_7 = \eta(h_1 - h_4) + h_4$$

A temperatura do ponto 7 é calculada à partir da concentração e entalpia neste ponto.

O calor à ser fornecido ao gerador é calculado à partir da equação (7)

$$Q_g = w_d h_8 + w_a h_2 - w_b h_4$$

O cálculo do trabalho da bomba de licor é feito pela seguinte equação:

$$W = \dot{m} \int v \, dP$$

$$W = \dot{m} v \Delta P$$

$$W = \dot{m}_4 v_4 (P_{15} - P_4)$$

$$\text{onde } \dot{m}_4 = W_b$$

$$W = 23,43 w_b v_4 (P_{15} - P_4) \quad (18)$$

O cálculo do coeficiente de desempenho é feito pela equação (13)

$$\beta = \frac{Q_e}{Q_g + |W|}$$

Cálculo da variação de entalpia dos fluidos no trocador de calor dos licores

$$\Delta H_1 = w_a (h_1 - h_2) \quad (19)$$

O calor a ser removido no condensador é feito pela equação (5)

$$- Q_c = w_d (h_8 - h_9)$$

O calor a ser removido do absorvedor é feito pela equação (11)

$$-Q_a = Q_g + Q_e + Q_c - W$$

Os cálculos complementares que são necessários para os ciclos B são os seguintes:

. Cálculo da entalpia do ponto 13 é feito a partir da equação (12)

$$h_{13} = h_{12} + h_9 - h_{10}$$

A temperatura do ponto 13 é obtida a partir da entalpia e pressão para este ponto.

. Cálculo da variação de entalpia no pré-resfriador

$$\Delta H_p = w_d (h_9 - h_{10}) \quad \text{ou} \quad (20)$$

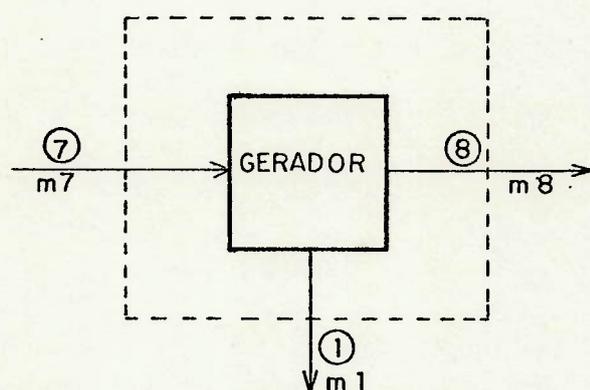
$$\Delta H_p = w_d (h_{13} - h_{12})$$

. Cálculo da variação de entalpia na serpentina superior do gerador

$$\Delta H_r = w_a (h_5 - h_4) \quad (21)$$

Os cálculos para o ciclo F se assemelham ao ciclo A à menos do seguinte item :

. Cálculo da vazão relativa é feito através do balanço de massa em torno do gerador.



onde:

$$m_8 = w_d$$

$$m_7 = w_b$$

$$m_1 = w_a$$

$$w_d = w_b + w_a \quad (14)$$

Fazendo-se o balanço de massa para o brometo de lítio

$$w_a x_a = x_b w_b$$

com a equação (14) tem-se:

$$w_a x_a = x_b w_d + x_b w_a$$

$$w_a (x_a - x_b) = x_b w_d$$

$$\frac{w_a}{w_d} = \frac{x_b}{(x_a - x_b)} \quad (21)$$

## 2.2 Fixação do Intervalo de Variação dos Parâmetros

Para elaboração dos cálculos dos ciclos de amônia e água e de água e brometo de lítio, surge a necessidade de fixação do intervalo de variação dos parâmetros.

Os limites dos parâmetros que variam nestes ciclos são apresentados a seguir.

1 - A temperatura do evaporador depende da aplicação do ciclo, ou seja, por exemplo, se este for empregado para resfriamento do ar, ou resfriamento de fluido, ou então para formação de gelo. Uma vez fixada a aplicação, a temperatura estará imediatamente fixada. Nos cálculos realizados, os intervalos considerados para a temperatura do evaporador foram os seguintes:

- . Ciclo de absorção de amônia e água, de  $-11^{\circ}\text{C}$  a  $5^{\circ}\text{C}$
- . Ciclo de absorção de água e brometo de lítio,  $4^{\circ}\text{C}$  a  $10^{\circ}\text{C}$ , devido ao refrigerante ser água e

ter como restrição o seu congelamento.

2- A temperatura do condensador depende do meio que é utilizado para remover o calor do condensador. Se este é ar, água de resfriamento ou outro fluido, o intervalo empregado nos ciclos é de  $25^{\circ}\text{C}$  a  $45^{\circ}\text{C}$ .

3- A temperatura do absorvedor depende do meio que será utilizado para remover o calor do absorvedor, se este é ar ou água de resfriamento. Nos cálculos realizados, o intervalo considerado para a temperatura do absorvedor foram os seguintes:

- . ciclo de absorção de amônia e água, de  $25^{\circ}\text{C}$  a  $45^{\circ}\text{C}$
- . ciclo de absorção de água e brometo de lítio, de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $35^{\circ}\text{C}$ , devido ao risco de ocorrer cristalização com temperaturas mais elevadas que  $35^{\circ}\text{C}$ .

O meio que removerá o calor do condensador ou o do absorvedor não precisa ser obrigatoriamente o mesmo, resultando assim que a temperatura do condensador pode ser diferente da temperatura do absorvedor.

Os parâmetros com limites fixos nos ciclos de amônia e água e nos de água e brometo de lítio, são citados a seguir.

4 - Rendimento do trocador de calor dos licores, é admitido sendo 60%, considerando os casos reais.

5 - A perda de carga entre o evaporador e o absorvedor é desprezado.

Os parâmetros com limites fixos exclusivamente para os ciclos de absorção amônia e água, considerando os dados práticos reais, são os seguintes:

6 - A diferença entre a temperatura de entrada e saída do refrigerante no condensador, é de  $5^{\circ}\text{C}$  de acordo com a ASHRAE [1].

7 - A diferença entre a temperatura de entrada e saída do refrigerante líquido no pré-resfriador, no ciclo tipo B, é de  $24^{\circ}\text{C}$ , de acordo com ASHRAE [1]

8 - A temperatura do licor fraco que entra no absorvedor (ponto 2), no ciclo A é  $5,6^{\circ}\text{C}$  ( $10^{\circ}\text{F}$ ) abaixo da temperatura do

absorvedor nos ciclos B, C e D, de acordo com recomendação de Ludwick (2).

9 - A temperatura do licor fraco que sai do gerador (ponto 1), no ciclo A é 20°C abaixo da temperatura do fundo deste (ponto 15), no ciclo B, de acordo com ASHRAE (1).

### 2.3 - Ciclo de Absorção de Amônia e Água.

Os cálculos sobre o ciclo de absorção de amônia e água, foram baseados em uma carga térmica de 1 TR no evaporador. O intervalo de variação dos parâmetros utilizados nos cálculos encontram-se descritos no item 2.2.

Os cálculos estão expostos da seguinte forma: - primeiramente é apresentado cálculos detalhados para um caso de cada ciclo A,B,C,D e E, e após é apresentado o restante dos resultados para os outros casos dos ciclos, de forma tabelada.

#### 2.3.1 - Caso A

Este caso, baseia-se no ciclo A, vide figura 2, com os seguintes parâmetros adotados:

- temperatura do absorvedor =  $45^{\circ}\text{C}$
- temperatura na entrada do condensador =  $45^{\circ}\text{C}$
- temperatura na saída do condensador =  $40^{\circ}\text{C}$
- temperatura na saída do evaporador =  $-11^{\circ}\text{C}$
- pressão no condensador =  $17,9 \text{ kg}^*/\text{cm}^2\text{a}$
- pressão no evaporador =  $2,8 \text{ kg}^*/\text{cm}^2\text{a}$
- pressão no absorvedor =  $2,8 \text{ kg}^*/\text{cm}^2\text{a}$
- carga térmica requerida = 1 TR =  $3315 \text{ kcal/h}$
- rendimento do trocador de calor dos licores = 60%

Cálculo da vazão de amônia, pela equação (6)

$$w_d = \frac{Q_e}{(h_{12} - h_{11})} = \frac{1 \cdot 3315}{(293,2 - 45)} = 13,3 \text{ kg/h de amônia}$$

As vazões relativas são determinadas a partir do balanço de massa, pela equação (15)

$$\frac{w_a}{w_d} = \frac{x_d - x_b}{x_b - x_a}$$

onde:  $x_d$  = concentração de amônia no refrigerante, kg/kg

$x_a$  = concentração de amônia no absorvente ou licor fraco Kg/Kg.

$x_b$  = concentração de amônia na solução refrigerante - absorvente ou licor forte, Kg/Kg.

Determinação da concentração do licor forte que sai do fundo do absorvedor, é obtida através do gráfico 35. Assim sendo com  $P_4 = 2,8 \text{ kg/cm}^2$  e  $t_4 = 45^\circ\text{C}$ , tem-se  $x_b = 35\%$

Admitindo-se uma diferença entre o licor forte e o licor fraco de 10%, tem-se:

$$\begin{aligned} x_b - x_a &= 10\% \\ x_a &= 25\% \end{aligned}$$

Cálculo das vazões relativas, é fornecido pela equação (14) e (15)

$$\frac{w_a}{w_d} = \frac{x_d - x_b}{x_b - x_a} = \frac{1 - 0,35}{0,35 - 0,25} = 6,5$$

$$\frac{w_b}{w_d} = \frac{w_a}{w_d} + \frac{w_d}{w_d} = 6,5 + 1 = 7,5$$

Cálculo das vazões dos licores fracos e forte

$$w_a = 6,5 w_d = 86,7 \text{ kg/h}$$

$$w_b = 7,5 w_d = 100 \text{ kg/h}$$

A temperatura do fundo do gerador é determinada à partir da concentração do licor fraco e a pressão do gerador, empregando o gráfico 35.

$$P_{15} = 17,9 \text{ kg/cm}^2 \text{ a e } x_b = 25\%, \text{ tem-se } t_{15} = 138^\circ\text{C}$$

Considerando-se o rendimento do trocador de calor dos licores de 60%, tem-se pela equação (16):

$$\eta = \frac{h_7 - h_4}{h_1 - h_4} = 0,6$$

Determinação da entalpia do ponto 2, pela equação (17)

$$\eta = \frac{(h_1 - h_2) \frac{w_a}{w_b}}{(h_1 - h_4)}$$

$$0,6 = \frac{(105,6 - h_2) 6,5}{(105,6 + 13,9) 7,5}$$

$$h_2 = 22,8 \text{ kcal/kg}$$

Com a concentração de 25% do licor fraco, tem-se pelo gráfico 35,  $t_2 = 62,8^\circ\text{C}$

Cálculo da entalpia do ponto 7, pela equação(16)

$$\eta = \frac{h_7 - h_4}{h_1 - h_4}$$

$$0,6 = \frac{h_7 + 13,9}{105,6 + 13,9}$$

$$h_7 = 57,8$$

Com a concentração de 35% do licor fraco, tem-se pelo gráfico 35,  $T_7 = 104,4^\circ\text{C}$ .

Calor a ser fornecido no gerador, pela equação

(11)

$$Q_g = w_d h_8 + w_a h_2 - w_b h_4$$

$$Q_g = 13,3 \cdot 307,7 - 86,7 \cdot 22,8 + 100 \cdot 13,9$$

$$Q_g = 74,59 \text{ kcal/h.}$$

Coefficiente de desempenho pela equação (13)

$$\beta = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{3315}{7459} = 0,44$$

Coefficiente de desempenho incluindo o trabalho da bomba

$$\text{- trabalho da bomba} = W = 23,43 \Delta P \cdot w_b \cdot \dot{v}$$

$$W = 23,43 (17,92 - 2,8) \cdot 13,3 \cdot 1,18 \cdot 10^{-3} = 9,6 \text{ kcal/h}$$

Portanto, será considerado desprezível

$$\beta = \frac{Q_e}{Q_g + W} = \frac{3315}{7471} = 0,44$$

Varição de Entalpia dos fluidos no trocador de calor dos licores pela equação (19)

$$\Delta H_1 = w_a (h_1 - h_2) = 86,7 (105,6 - 22,8) = 7171 \text{ kcal/h}$$

Calor a ser removido no condensador, pela equação

(5)

$$-Q_c = w_d (h_8 - h_9) = 13,3 (307,7 - 45) = 3503 \text{ kcal/h}$$

Calor a ser removido no absorvedor, pela equação

(11)

$$- Q_a = Q_g + Q_e + Q_c = 7284 \text{ kcal/h.}$$

### 2.3.2 - Caso B1

Este caso, baseia-se no ciclo B, vide figura 3, com os seguintes parâmetros adotados:

- temperatura do absorvedor =  $45^{\circ}\text{C}$
- temperatura na entrada do condensador =  $45^{\circ}\text{C}$
- temperatura na saída do condensador =  $40^{\circ}\text{C}$
- temperatura na saída do evaporador =  $-11^{\circ}\text{C}$
- pressão no condensador =  $17,9 \text{ kg}^*/\text{cm}^2 \text{ a}$
- pressão no evaporador =  $2,8 \text{ kg}^*/\text{cm}^2 \text{ a}$
- pressão no absorvedor =  $2,8 \text{ kg}^*/\text{cm}^2 \text{ a}$
- carga térmica requerida = 1 TR = 3315 kcal/h

A vazão de amônia pode ser calculada pela equação (6)

$$w_d = \frac{Q_e}{(h_{12} - h_{11})} = \frac{1 \cdot 3315}{(293,2 - 22,5)} = 12,25 \text{ kg/h de amônia.}$$

A entalpia e temperatura do ponto 13 são calculadas a partir da aplicação do Primeiro Princípio da Termodinâmica no pré-resfriador de líquido. E admitindo-se uma diferença de temperaturas de  $24^{\circ}\text{C}$ , no líquido que tem a sua tem-

peratura reduzida, no pré-resfriador, tem-se:

$$t_9 - 24 = t_{10}$$

$$t_{10} = 21^{\circ}\text{C}$$

pela equação (12)

$$h_{13} = h_{12} + h_9 - h_{10}$$

$$h_{13} = 293,2 + 45 - 22,5 = 315,7 \text{ kcal/h}$$

portanto,  $t_{13} = 21,1^{\circ}\text{C}$ , pelo gráfico 34.

As vazões relativas são determinadas a partir de balanços de massa, pela equação (15)

$$\frac{w_a}{w_d} = \frac{x_d - x_b}{x_b - x_a}$$

onde:

$x_d$  = concentração de amônia no refrigerante, kg/kg

$x_a$  = concentração de amônia no absorvente ou licor fraco, Kg/Kg.

$x_b$  = concentração de amônia na solução refrigerante-absorvente ou licor forte, Kg/Kg.

Determinação das concentrações do licor forte - que sai do fundo do absorvedor, é feita pelo gráfico 35.

Com  $P_4 = 2,8 \text{ kg}^*/\text{cm}^2\text{a}$  e  $t_4 = 45^{\circ}\text{C}$ , tem-se  $x_a = 35\%$ .

Admitindo-se uma diferença de concentração entre o licor forte e o licor fraco de 10%, tem-se:

$$x_a - x_b = 10\%$$

$$x_b = 25\%$$

Cálculo das vazões relativas, é dado pelas equações 14 e 15

$$\frac{w_a}{w_d} = \frac{x_d - x_b}{x_b - x_a} = \frac{1 - 0,35}{0,35 - 0,25} = 6,5$$

$$\frac{w_b}{w_d} = \frac{w_a}{w_d} = \frac{w_d}{w_d} = 6,5 + 1 = 7,5$$

A temperatura do fundo do gerador é calculada a partir da concentração do licor fraco e a pressão do gerador

$$P_{15} = 17,9 \text{ kg/cm}^2 \text{ a e } x_b = 25\%, \text{ tem-se}$$

$$t_{15} = 28^{\circ}\text{C}$$

Admitindo-se a temperatura que entra no absorvedor, ponto 2 de  $5,6^{\circ}\text{C}$  ( $10^{\circ}\text{F}$ , conforme recomendação Ludwick [2]) abaixo da temperatura do absorvedor, tem-se:

$$t_4 - 5,6 = t_2$$

$$t_2 = 39,4^{\circ}\text{C}$$

E admitindo-se uma temperatura do licor fraco que sai do gerador, ponto 1, 20°C (conforme recomendação da ASHRAE [1] ) abaixo da temperatura do fundo do gerador, ponto 15, tem-se:

$$\begin{aligned}t_{15} - 20 &= t_1 \\t_1 &= 118 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Admitindo-se uma temperatura do licor forte - que sai do condensador de refluxo, ponto 5, 15°C acima da temperatura do licor forte que sai do observador, ponto 4, tem-se:

$$\begin{aligned}t_4 + 15 &= t_5 \\t_5 &= 60 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Com as temperaturas e as concentrações nos pontos 1, 2 e 5, tem-se as entalpias nestes pontos, através do gráfico 35.

$$\begin{aligned}h_1 &= 83,3 \text{ kcal/kg} \\h_2 &= - 2,8 \text{ kcal/kg} \\h_5 &= 11,1 \text{ kcal/kg}\end{aligned}$$

A entalpia do líquido no ponto 7, é calculada através da equação (9)

$$\begin{aligned}w_b h_7 + w_a h_2 &= w_b h_5 + w_a h_1 \\h_7 &= (h_1 - h_2) \frac{w_a}{w_b} + h_5\end{aligned}$$

$$h_7 = (83,3 + 2,8) \frac{6,5}{7,5} + 11,1 = 85,7 \text{ kcal/kg}$$

Com a concentração no ponto 7 de 35%, tem-se  $t_7 = 127^\circ\text{C}$ .

Cálculo das vazões do licor fraco e forte:

$$w_a = 6,5 \quad w_d = 6,5 \cdot 12,25 = 79,6 \text{ kg/h licor fraco}$$

$$w_b = 7,5 \quad w_d = 7,5 \cdot 12,25 = 91,8 \text{ kg/h licor forte}$$

O calor a ser fornecido no gerador é calculado através da aplicação do 1º princípio da termodinâmica, ao redor do gerador e do trocador de calor dos licores, pela equação (7)

$$Q_g = w_d h_8 + w_a h_2 - w_b h_4$$

A entalpia do ponto 8 é calculada através da sua temperatura e pressão, pelo gráfico 35

$$t_8 = 45^\circ\text{C} \quad e \quad P_8 = 17,9 \text{ kg/cm}^2, \text{ tem-se}$$

$$h_8 = 307,7 \text{ kcal/kg}$$

$$Q_g = 12,25 \cdot 307,7 - 79,6 \cdot 2,8 + 91,8 \cdot 13,9$$

$$Q_g = 4697 \text{ kcal/h}$$

Cálculo do coeficiente de desempenho, é feito pela equação (13)

$$\beta = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{3315}{4697} = 0,71$$

Variação de entalpia no trocador de calor dos licores, é dada pela equação (19)

$$\Delta H_1 = w_a (h_1 - h_2) = 79,6 (83,3 + 2,8) = 6855 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Calor a ser removido no condensador, é dado - pela equação (5)

$$-Q_c = w_d (h_8 - h_9) = 12,25 (307,7 - 45,1) = 3216 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Calor trocado na serpentina superior do gerador é dada pela equação (21)

$$\Delta H_r = w_b (h_5 - h_4) = 91,8 (11,1 + 13,9) = 2295 \text{ kcal/h}$$

Calor a ser removido no absorvedor, é dada pela equação (11)

$$-Q_a = Q_g + Q_e + Q_c$$

$$-Q_a = 4796 \text{ kcal/h}$$

Calor trocado no pré-resfriador é dado pela equação (20)

$$\Delta H_p = w_d (h_9 - h_{10}) = 12,25(45 - 22,5) = 249 \text{ kcal/h}$$

### 2.3.3 - Caso C1

Este caso, baseia-se no ciclo C, vide figura 4, com as mesmas variáveis admitidas no caso B1 tem-se as seguintes variações com relação a este caso.

Cálculo da vazão de amônia, é fornecido pela equação (6)

$$w_d = \frac{Q_e}{(h_{12} - h_{11})} = \frac{1 \cdot 3315}{(293,2 - 45)} = 13,3 \text{ kg/h de amônia.}$$

Cálculo das vazões do licor fraco e forte

$$w_a = 6,5 w_d = 86,6 \text{ kg/h licor fraco}$$

$$w_b = 7,5 w_d = 100 \text{ kg/h licor forte}$$

Cálculo do calor a ser fornecido no gerador, é fornecido pela equação(7)

$$Q_g = w_d h_8 + w_a h_2 - w_b h_4$$

$$Q_g = 13,3 \cdot 307,7 + 86,6 - 2,8 - 100 \cdot 13,9 = 3251 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Cálculo do coeficiente de desempenho, é fornecido pela equação (13)

$$\beta = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{3315}{5251} = 0,63$$

Variação de entalpia dos fluidos no trocador de calor dos licores, é dada pela equação (19)

$$\Delta H_1 = w_a (h_1 - h_2) = 7460 \text{ Btu/h}$$

Calor a ser removido no condensador, é dado pela equação (5)

$$-Q_c = w_d (h_8 - h_9) = 7502 \text{ kcal/h}$$

Calor trocado na serpentina superior do gerador é dada pela equação (21)

$$\Delta H_r = w_b (h_5 - h_4) = 5513 \text{ kcal/h}$$

Calor a ser removido no absorvedor, é dada pela equação (11)

$$-Q_a = Q_g + Q_e + Q_c = 5064 \text{ kcal/h}$$

## 2.3.4 - Caso D1

Este caso, baseia-se no ciclo D, vide figura 5, com as mesmas variáveis admitidas no caso B1, tem-se as seguintes variações com relação a este caso:

$$t_9 = t_{10} \quad e \quad t_{15} = t_1 ; \quad h_9 = h_{10} \quad e \quad h_{15} = h_1$$

Pelo 1º Princípio da Termodinâmica no trocador de calor, - tem-se a equação (9)

$$\begin{aligned} h_7 &= (h_1 - h_2) \frac{w_a}{w_b} + h_5 = (105,6 + 2,8) \frac{6,5}{7,5} + 11,1 = \\ &= 105 \text{ kcal/h.} \end{aligned}$$

com a concentração de 35%, tem-se  $t_7 = 115,6^\circ\text{C}$ , pelo gráfico 35.

Calor a ser fornecido no gerador, é dada pela equação (7)

$$Q_g = w_d h_8 + w_a h_2 - w_b h_4 = 5251 \text{ kcal/h}$$

Coefficiente de desempenho:

$$\beta = 0,63$$

Variação de entalpia no trocador de calor dos licores, é dada pela equação (19)

$$\Delta H_1 = w_a (h_1 - h_2) = 9386 \text{ kcal/h}$$

Calor a ser removido no condensador, é dada pela equação (5)

$$-Q_c = w_d (h_8 - h_9) = 3502 \text{ kcal/h}$$

Calor trocado na serpentina superior do gerador é dado pela equação (21)

$$\Delta H_r = w_b (h_5 - h_4) = 1111 \text{ kcal/h}$$

Calor a ser removido no absorvedor, é dada pela equação (11)

$$-Q_a = Q_g + Q_e + Q_c = 5064 \text{ kcal/h}$$

### 2.3.5 - Caso E1

Este caso, baseia-se no ciclo E, vide figura 6, com as mesmas variáveis admitidas no caso B1, tem-se as seguintes variações com relação a este caso

$$t_{15} = t_1 = t_2 \quad \text{Pontos 5 e 7 estão cancelados}$$

$$t_9 = t_{10}$$

Calor a ser fornecido no gerador, é dada pela equação (7)

$$\begin{aligned} Q_g &= w_d h_8 + w_a h_2 - w_b h_4 = \\ &= 13,3 \cdot 307,7 + 86,6 \cdot 105,6 - 100 \cdot 13,9 \\ Q_g &= 14637 \text{ kcal/h} \end{aligned}$$

Coeficiente de desempenho, é dado pela equação (13)

$$\beta = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{3315}{14637} = 0,23$$

Calor a ser removido no condensador, é dado pela equação (5)

$$-Q_c = 3502 \text{ kcal/h}$$

Calor a ser removido no absorvedor, é dado pela equação (11)

$$-Q_a = Q_g + Q_e + Q_c = 14450 \text{ kcal/h}$$

2.3.6- Casos Estudados para o Ciclo de Absorção de amônia e água.

CASOS DO CICLO A

PARÂMETROS	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
Temp. Cond. (°C)	45	35	25	45	45	25	25	45	45	45	45	45
Temp. Absv. (°C)	45	45	45	35	25	25	35	45	45	45	45	45
Temp. Evap. (°C)	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-5	0	5
Dif. Concentração entre os licores (°C)	10	10	10	10	10	10	10	15	20	10	10	10
RESULTADOS												
Conc. licor forte (%)	35	35	35	30	37	30	35	35	35	40	42	46
Conc. licor fraco (%)	25	25	25	20	27	27	20	20	15	30	32	36
Vazão licor forte (kg/h)	100	97,6	93,5	93,1	83,8	76,9	85,4	70,7	56,7	91,1	88,2	82,7
Vazão licor fraco (kg/h)	86,6	84,6	81,1	79,8	70,5	64,7	73,2	57,3	43,4	78,1	75,2	69,8
Vazão refrigerante (kg/h)	13,3	13	12,5	13,3	13,3	12,2	12,2	13,3	13,3	13	12,97	12,9
Temp. ger. (°C)	138	127	112	149	110	87,8	102	149	160	177	121	113
Calor gerador (kcal/h)	7472	6998	6262	7067	6379	5409	5770	6362	5741	6530	6279	5746
"Calor" trocador (kcal/h)	7171	6348	5144	6223	4392	3205	4128	8904	5343	5468	5000	3998
Calor condens. (kcal/h)	3503	3494	3502	3502	3502	3471	3471	3503	3533	3419	3415	3415
Calor absorv. (kcal/h)	7287	6819	6086	6879	5492	5253	5614	6174	5553	6425	6179	5646
Coef. de Desempenho (%)	44	47	53	47	58	61	57	52	58	51	53	58

PARÂMETROS	CASOS DO CICLO B						
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Temp.condens. (°C)	4,5	35	25	45	45	25	25
Temp.Absorv. (°C)	45	45	45	35	25	25	35
Temp.Evapor. (°C)	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-11
Dif.de concentr. entre os licor.(%)	10	10	10	10	10	10	10
RESULTADOS							
Conc.licor forte(%)	35	35	35	40	47	47	40
Conc:licor fraco(%)	25	25	25	30	37	37	30
Vazão lic.forte(kg/h)	91,8	86,4	71,9	83,8	75,4	69,7	77,5
Vazão lic.fraco(kg/h)	79,6	74,9	63,4	71,8	63,5	58,6	66,4
Vazão refriger.(kg/h)	12,25	11,5	11,1	14,7	14,7	11,1	11,1
Temp.gerador(°C)	138	127	112	127	110	88	102
Calor gerador(kcal/h)	4697	4529	4325	4146	3907	3589	3814
"Calor" troc.(kcal/h)	6855	5409	3997	7784	4760	3349	3689
Calor condens.(kcal/h)	3216	3092	3073	3145	3145	3406	3148
Calor absorv.(kcal/h)	4796	4751	4566	4316	4077	3498	3658
Coef.desempenho(%)	71	73	77	80	85	92	87

## CASOS DO CICLO C

PARÂMETROS	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Temp.condensador (°C)	45	35	25	45	45	25	25
Temp.absorvedor (°C)	45	45	45	35	25	25	35
Temp.evaporador (°C)	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-11
Dif.concentrações entre licores (%)	10	10	10	10	10	10	10
RESÚLTADOS							
Conc.licor forte(%)	35	35	35	40	47	47	40
Conc.licor fraco(%)	25	25	25	30	37	37	30
Vazão lic.forte(kg/h)	100	97,6	93,5	93,3	84,0	76,9	85,4
Vazão lic.fraco(kg/h)	86,6	84,6	81,1	80	70,7	64,7	73,2
Vazão refriger.(kg/h)	13,3	13,0	12,5	13,3	13,3	12,2	12,2
Temp.gerador (°C)	138	127	112	127	110	88	102
Calor gerador(kcal/h)	5251	5117	4875	4622	4350	3957	4204
'Calor' trocador(kcal/h)	7460	6113	4505	6890	5300	3414	4067
Calor condens.(kcal/h)	3502	3494	3464	3502	3502	3471	3471
Calor absorv.(kcal/h)	5064	4938	4723	4434	4163	3801	4048
Coef.desempenho(%)	63	65	68	72	76	84	79

## CASOS DO CICLO D

PARÂMETROS	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Temp.condensador (°C)	45	35	25	45	45	25	25
Temp.absorvedor (°C)	45	45	45	35	25	25	35
Temp.evaporador (°C)	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-11
Dif.concentração entre licores (%)	10	10	10	10	10	10	10
RESULTADOS							
Conc.licor forte (%)	35	35	35	40	47	47	40
Conc.licor fraco (%)	25	25	25	30	37	37	30
Vazão lic.forte (kg/h)	100	97,6	93,5	93,3	84	76,9	85,4
Vazão lic.fraco (kg/h)	86,6	84,6	81,1	80	70,7	64,7	73,2
Vazão refriger. (kg/h)	13,3	13,0	12,5	13,3	13,3	12,2	12,2
Temp.gerador (°C)	138	127	112	127	110	88	102
Calor gerador (kcal/h)	5251	5117	5325	4622	4351	3957	4204
Calor trocad. (kcal/h)	9386	8229	6532	8668	6871	4672	5694
Calor condens. (kcal/h)	3502	3494	3464	3502	3502	3471	3471
Calor absorved (kcal/h)	5064	5131	5176	4434	4164	3801	4048
Coef.desempenho (%)	63	65	68	72	76	84	79

## CASOS DO CICLO E

PARÂMETROS	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
Temp.condensador (°C)	45	35	25	45	45	25	25
Temp.absorvedor (°C)	45	45	45	35	25	25	35
Temp.evaporador (°C)	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-11
Dif.de concentração entre os licores (%)	10	10	10	10	10	10	10
RESULTADOS							
Conc.licor forte (%)	35	35	35	40	47	47	40
Conc.licor fraco (%)	25	25	25	30	37	37	30
Vazão licor forte(kg/h)	100	97,6	93,5	93,3	84	76,9	85,4
Vazão licor fraco(kg/h)	86,6	84,6	81,1	80	70,7	64,7	73,2
Vazão refrigerant(kg/h)	13,3	13,0	12,5	13,3	13,3	12,2	12,2
Temp.gerador (°C)	138	127	112	127	110	88	102
Calor gerador(kcal/h)	14637	13346	11257	13438	11222	8614	9898
"Calor" trocador(kcal/h)	-	-	-	-	-	-	-
Calor condens.(kcal/h)	3502	3494	3464	3502	3503	3471	3471
Calor absorv.(kcal/h)	14450	13159	11409	13251	11035	8458	9742
Coef.desempenho(%)	23	25	29	25	30	38	33

## 2.4 - Ciclo de absorção de água e brometo de lítio

Os cálculos sobre o ciclo de absorção de água e brometo de lítio, foram baseados em uma carga térmica de 1TR no evaporador. O intervalo de variação dos parâmetros utilizados nos cálculos encontram-se descritos no item 2.2. Os cálculos estão expostos da seguinte forma: primeiramente é apresentado um cálculo detalhado para um caso do ciclo F, e após é apresentado o restante dos resultados para os outros casos do ciclo, de forma tabelada.

### 2.4.1 - Caso F1

Este caso baseia-se no ciclo F, vide figura 2, com os seguintes parâmetros adotados:

- temperatura do absorvedor = 35 °C
- temperatura do condensador = 35 °C
- temperatura do evaporador = 4 °C
- pressão no condensador = 42,4 mm Hg a
- pressão do evaporador = 6,05 mm Hg a
- pressão do absorvedor = 6,05 mm Hg a
- carga térmica requerida = 1 TR = 3315 kcal/h
- rendimento do trocador = 60%

A vazão de água é fornecida pela equação (6)

$$w_d = \frac{Q_e}{(h_{12} - h_9)} = \frac{1 \cdot 3315}{(599,4 - 35)} = 5,87 \text{ kg/h}$$

Determinação da concentração do licor forte que sai do fundo do absorvedor, é feita pelo gráfico 36.

com  $P_4 = 6,05 \text{ mm Hg}$  ,  $t_4 = 35^\circ\text{C}$  , tem-se:  $x_b = 56\%$

Admitindo-se uma diferença de 5% entre o licor forte e o licor fraco de 5%, tem-se:

$$x_a - x_b = 5\%$$

$$x_a = 61\%$$

Cálculo das vazões relativas, é fornecido pelas equações 21 e 14

$$\frac{w_a}{w_b} = \frac{x_b}{x_a - x_b} = \frac{0,61}{0,61 - 0,56} = 12,2$$

$$\frac{w_b}{w_d} = \frac{w_a}{w_d} + \frac{w_d}{w_d} = 12,2 + 1 = 13,2$$

Cálculo das vazões dos licores fraco e forte

$$w_a = 12,2 \cdot 5,87 = 71,61 \text{ kg/h}$$

$$w_b = 13,2 \cdot 5,87 = 77,48 \text{ kg/h}$$

A temperatura do fundo do gerador é calculada a partir da concentração do licor fraco e da pressão do gerador, pelo gráfico 36

$$P_{15} = 42,4 \text{ mm Hg a e } x_b = 56\%, \text{ tem-se:}$$

$$t_{15} = 81,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Considerando-se o rendimento do trocador de calor dos licores sendo 60%, tem-se pela equação (16) e (17)

$$\eta = \frac{h_7 - h_4}{h_1 - h_4}$$

Calculando-se a entalpia do ponto 2, pela equação (17)

$$\eta = \frac{(h_1 - h_2) \frac{w_a}{w_b}}{(h_1 - h_4)}$$

$$0,6 = \frac{46,7 - h_2}{46,7 - 20,6} \frac{6,5}{7,5}$$

$$h_2 = 29,7 \text{ kcal/kg}$$

Com a concentração de 61% do licor, tem-se pelo gráfico 37:

$$t_2 = 41,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Cálculo da entalpia do ponto 7, é dado pela equação (16)

$$\eta = \frac{h_7 - h_4}{h_1 - h_4}$$

$$h_7 = 0,6(46,7 - 20,6) + 20,6 = 36,2 \text{ kcal/kg}$$

Com a concentração do licor de 56%, tem-se pelo gráfico 37:

$$t_7 = 67,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Calor a ser fornecido ao gerador, é dado pela equação (7)

$$Q_g = w_d h_9 + w_a h_1 - w_b h_7$$

$$Q_g = 5,87 \cdot 612,8 + 71,61 \cdot 46,7 - 77,48 \cdot 36,2$$

$$Q_g = 4136 \text{ kcal/h}$$

Coeficiente de desempenho, é dado pela equação (13)

$$\beta = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{1 \cdot 3315}{4136} = 0,801$$

Com a concentração de 61% do licor, tem-se pelo gráfico 37:

$$t_2 = 41,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Cálculo da entalpia do ponto 7, é dado pela equação (16)

$$\eta = \frac{h_7 - h_4}{h_1 - h_4}$$

$$h_7 = 0,6(46,7 - 20,6) + 20,6 = 36,2 \text{ kcal/kg}$$

Com a concentração do licor de 56%, tem-se pelo gráfico 37:

$$t_7 = 67,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Calor a ser fornecido ao gerador, é dado pela equação (7)

$$Q_g = w_d h_9 + w_a h_1 - w_b h_7$$

$$Q_g = 5,87 \cdot 612,8 + 71,61 \cdot 46,7 - 77,48 \cdot 36,2$$

$$Q_g = 4136 \text{ kcal/h}$$

Coeficiente de desempenho, é dado pela equação (13)

$$\beta = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{1 \cdot 3315}{4136} = 0,801$$

Variação de entalpia dos fluídos no trocador de calor dos licores, é dada pela equação (19)

$$\Delta H_1 = w_a (h_1 - h_2)$$

$$\Delta H_1 = 71,61(46,7 - 29,7) = 1214 \text{ kcal/h}$$

Calor a ser removido no condensador é dado pela equação (5)

$$- Q_c = w_d (h_8 - h_9)$$

$$- Q_c = 5,87(612,8 - 35) = 3394 \text{ kcal/h}$$

Calor a ser removido do absorvedor, é dado pela equação (11)

$$-Q_a = Q_g + Q_e + Q_c = 4057 \text{ kcal/h}$$

2.4.2- Casos estudados para o ciclo de absorção de água e brometo de lítio.

CASOS DO CICLO F

PARÂMETROS	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Temp. condensador (°C)	35	30	25	35	35	25	35	35	35	35
Temp. absorvedor (°C)	35	35	35	30	25	25	35	35	35	35
Temp. evaporador (°C)	4	4	4	4	4	4	6	10	4	4
Dif. de concentrações entre os licores (%)	5	5	5	5	5	5	5	5	7	9
RESULTADOS										
Conc. licor forte (%)	55	55	55	53	55	50	54,5	52	56	56
Conc. licor fraco (%)	61	61	61	58	61	55	59,5	57	63	65
Vazão licor forte (kg/h)	77,5	75,7	76,1	74,0	70,5	75,7	72,5	66,7	58,7	48,2
Vazão licor fraco (kg/h)	71,6	71,2	70,4	68,1	64,6	69,8	66,7	72,5	52,9	42,3
Vazão refrigerante (kg/h)	5,87	5,84	5,77	5,87	5,87	5,77	5,86	5,85	5,87	5,87
Temp. do gerador (°C)	81	77	70	74	68	57	79	73	86	91
Calor gerador (kcal/h)	4136	4092	3914	4115	4106	3873	4084	4010	4048	3961
Calor do trocador (kcal/h)	1214	1151	966	1158	1081	807	1061	967	1137	1033
Calor do condensador (kcal/h)	3394	3385	3366	3406	3394	3366	3389	3379	3394	3394
Calor do absorvedor (kcal/h)	4057	4022	3862	4024	4026	3822	4010	3946	3969	3882
Cocf. de desempenho (%)	80,1	81	85	80,6	80,7	86	81,2	83	82	84

### 3. Interpretação Gráfica dos Resultados Teóricos Obtidos.

#### 1 - Ciclos de refrigeração por absorção com amônia e água.

Os gráficos elaborados representam os resultados obtidos dos cálculos do ciclo, onde foi avaliada a influência da variação de parâmetros tais como: temperatura do condensador, temperatura do absorvedor, temperatura do evaporador, diferença das concentrações dos licores forte e fraco, sobre o coeficiente de desempenho do ciclo e o calor trocado - nos equipamentos para o ciclo básico (ciclo A, vide figura 2). Também foi avaliada a influência de equipamentos suplementares e a variação da temperatura do condensador e do absorvedor nestes ciclos, sobre o coeficiente de desempenho e o calor trocado nos equipamentos nos ciclos B,C,D e E (Vide figuras 3,4,5 e 6 respectivamente).

A fim de facilitar a compreensão dos resultados dos gráficos, estes serão mencionados de forma otimizada.

O coeficiente de desempenho dos ciclos se reduz quando:

- A temperatura do condensador aumenta, ver figuras 9 e 14
- A temperatura do absorvedor aumenta, ver figuras 10, 11, 15 e 16.

A influência do trabalho da bomba no coeficiente de desempenho é pequena, porque a ordem de grandeza do valor

do trabalho em comparação com o calor do gerador é desprezível.

O ciclo completo (ciclo B) tem o coeficiente de desempenho ( $\beta$ ) mais elevado que os ciclos C e D o qual tem o  $\beta$  mais elevado que o ciclo E, (Vide figuras 14, 15 e 16).

O coeficiente de desempenho do ciclo aumenta quando:

- A diferença de concentração entre os licores aumenta. Ver figura 13
- A temperatura do evaporador aumenta. Ver figura 12

O calor a ser removido do condensador se reduz quando a temperatura do evaporador aumenta. Ver figura 24.

O calor a ser removido do condensador se mantém constante quando:

- A temperatura do absorvedor varia. Ver figuras 18 e 19.
- A diferença de concentração entre os licores forte e fraco varia. Ver figura 20.

O calor a ser removido do condensador aumenta quando a temperatura do condensador aumenta. Ver figura 21

A variação de entalpia dos fluídos no trocador de calor aumenta quando a temperatura do condensador aumenta. Ver item 2.3.6

O calor trocado na serpentina superior do gerador aumenta quando a temperatura do condensador aumenta. Ver item 2.3.6.

O calor a ser removido no absorvedor aumenta quando

- A temperatura do condensador aumenta. Ver figuras 17 e 21.

- A temperatura do absorvedor aumenta. Ver figuras 18, 19, 22 e 23.

O calor a ser removido no absorvedor se reduz quando a diferença de concentração entre os licores aumenta. Ver figura 20.

O calor a ser fornecido ao gerador aumenta quando

- A temperatura do condensador aumenta. Ver figuras 17 e 21.

- A temperatura do absorvedor aumenta. Ver figuras 18, 19, 22 e 23.

O calor a ser fornecido ao gerador se reduz quando:

- A temperatura do evaporador aumenta. Ver figura 24

- A diferença de concentração entre os licores aumenta. Ver figura 20.

## 2 - Ciclos de refrigeração por absorção com água e brometo de lítio.

Os gráficos elaborados representam os resultados obtidos dos cálculos do ciclo, onde foi avaliada a influência da variação de parâmetros tais como: temperatura do condensador, temperatura do evaporador, diferença das concentrações dos licores forte e fraco, sobre o coeficiente de desempenho do ciclo e o calor trocado nos equipamentos para o ci-

clo básico (Ciclo "F", vide figura 2).

O coeficiente de desempenho do ciclo se reduz -  
quando:

- A temperatura do condensador aumenta. Ver figura 25
- A temperatura do absorvedor aumenta. Ver figura 26

A influência do trabalho da bomba no coeficiente de desempenho é pequena, porque a diferença de pressão neste ciclo que emprega água e brometo de lítio, é pequena.

O coeficiente de desempenho se eleva quando:

- A temperatura do evaporador aumenta. Ver figura 28
- A diferença de concentrações entre os licores aumenta. Ver figura 29

O calor a ser removido do condensador mantém-se constante quando:

- A temperatura do absorvedor varia. Ver figuras 30 e 31
- A diferença de concentrações varia. Ver figura 34

O calor a ser removido do condensador, se eleva quando:

- A temperatura do condensador aumenta. Ver figura 32
- A temperatura do evaporador aumenta. Ver figura 33.

O calor a ser fornecido ao gerador se reduz quando:

- A temperatura do evaporador se eleva. Ver figura 33
- A diferença de concentrações dos licores aumenta. Ver figura 34.

O calor a ser removido do absorvedor diminui

quando:

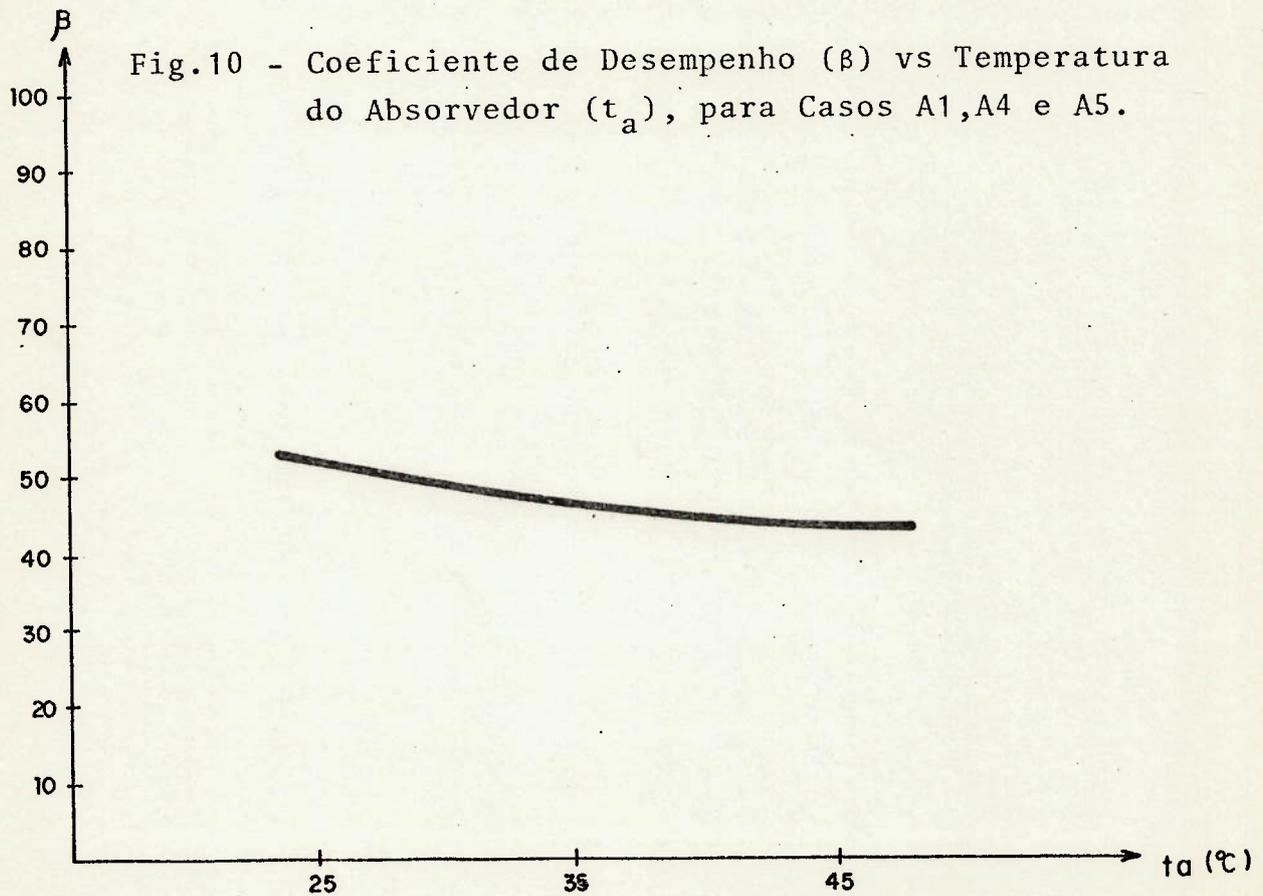
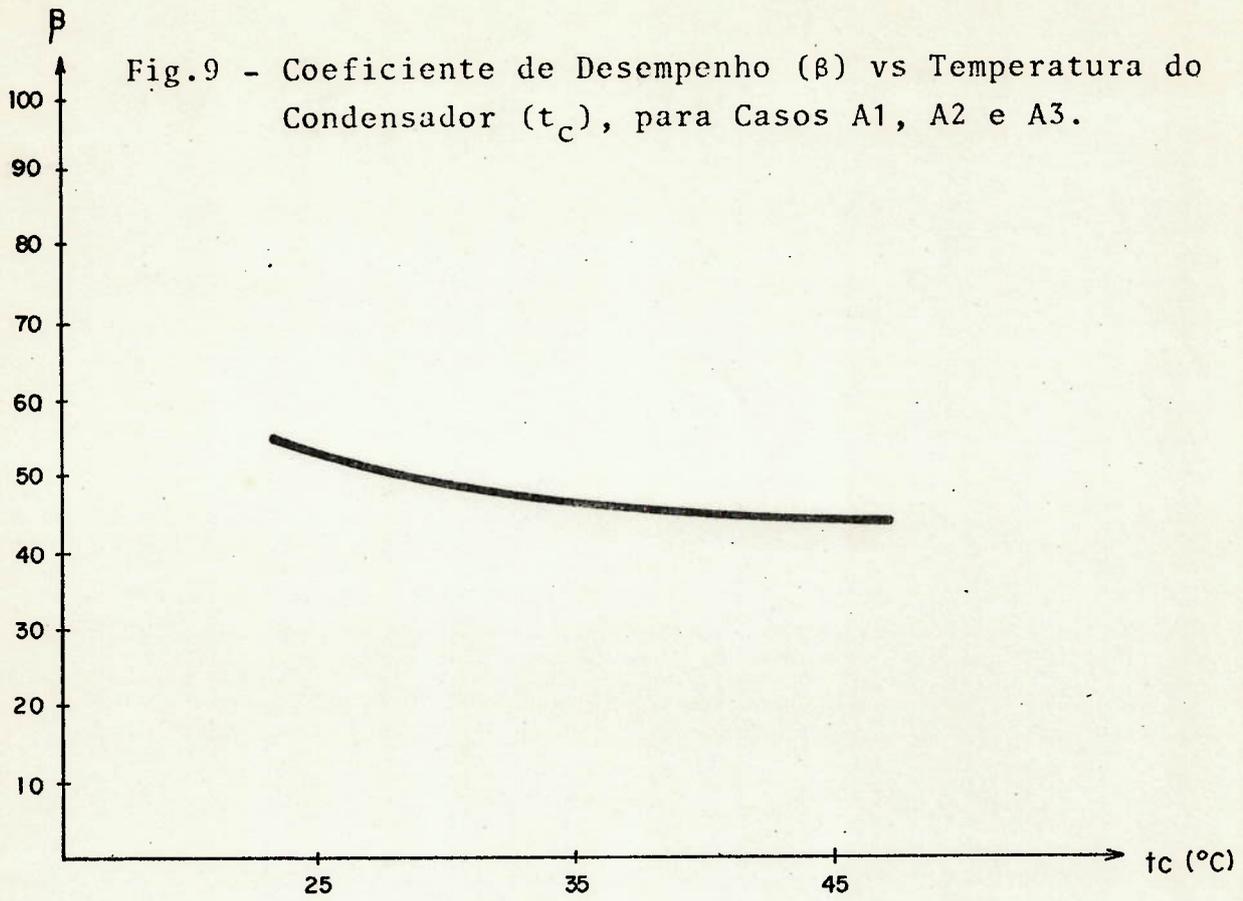
- A temperatura do evaporado aumenta. Ver figura 33.
- A diferença de concentrações dos licores aumenta. Ver figura 34.

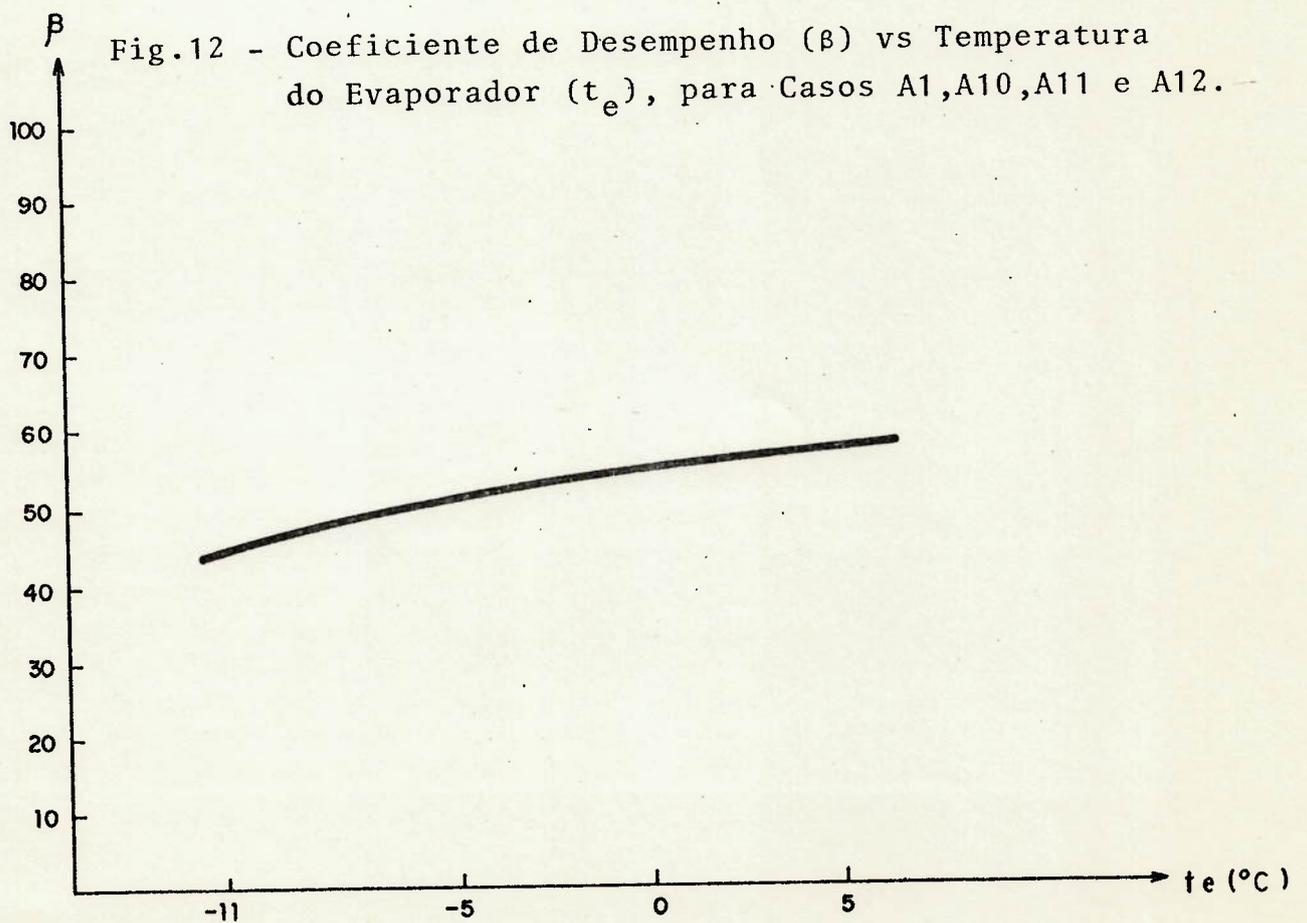
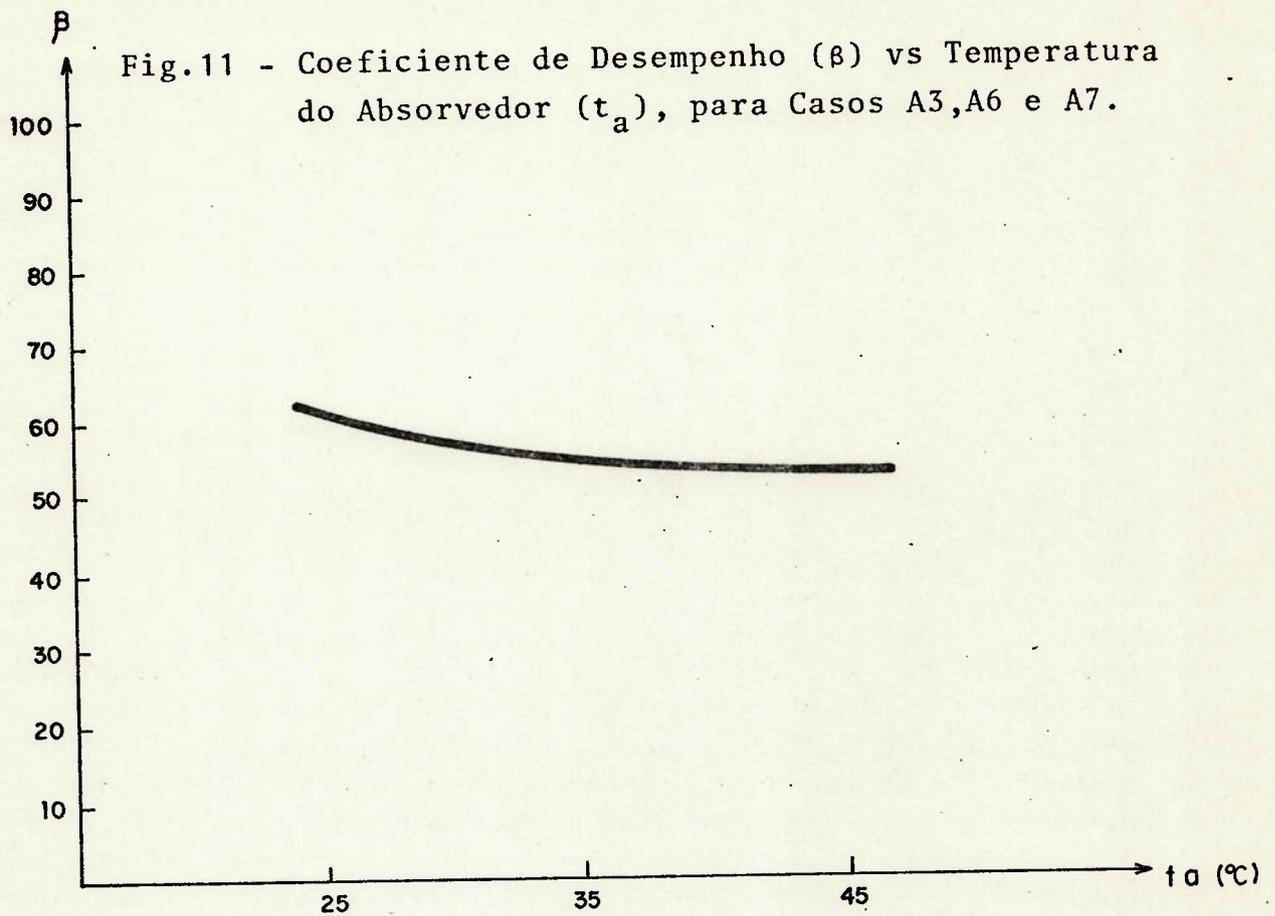
O calor a ser removido do absorvedor se eleva -

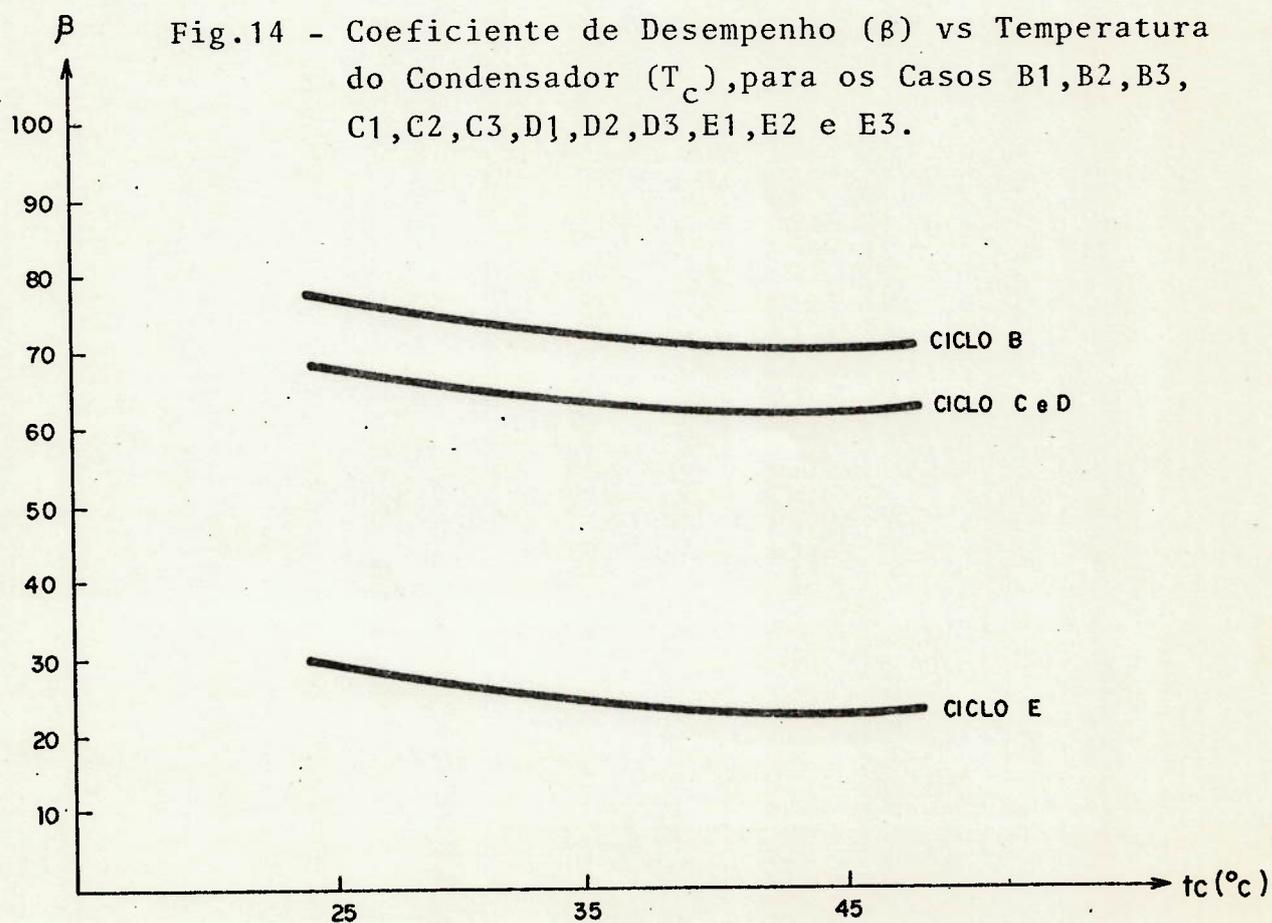
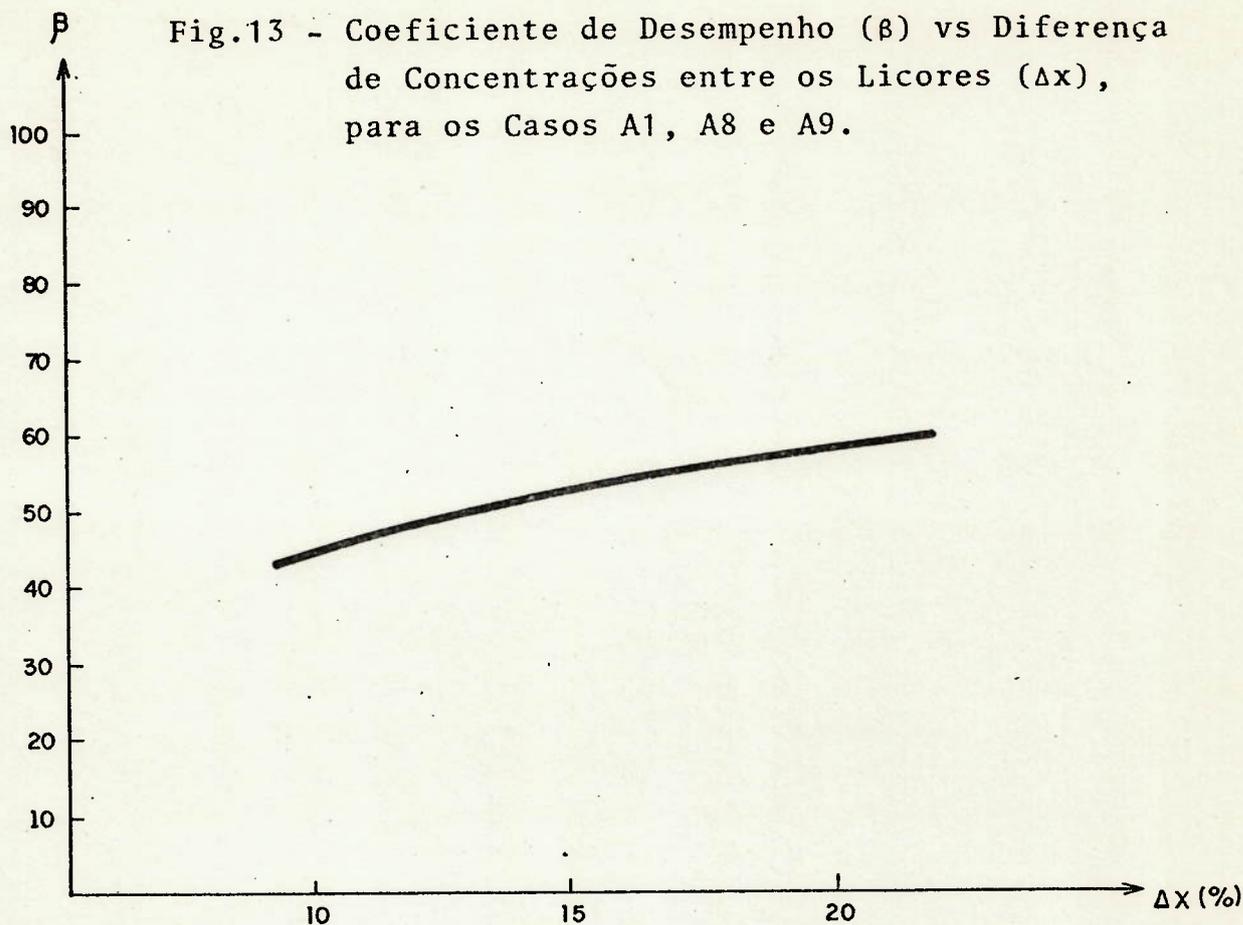
quando:

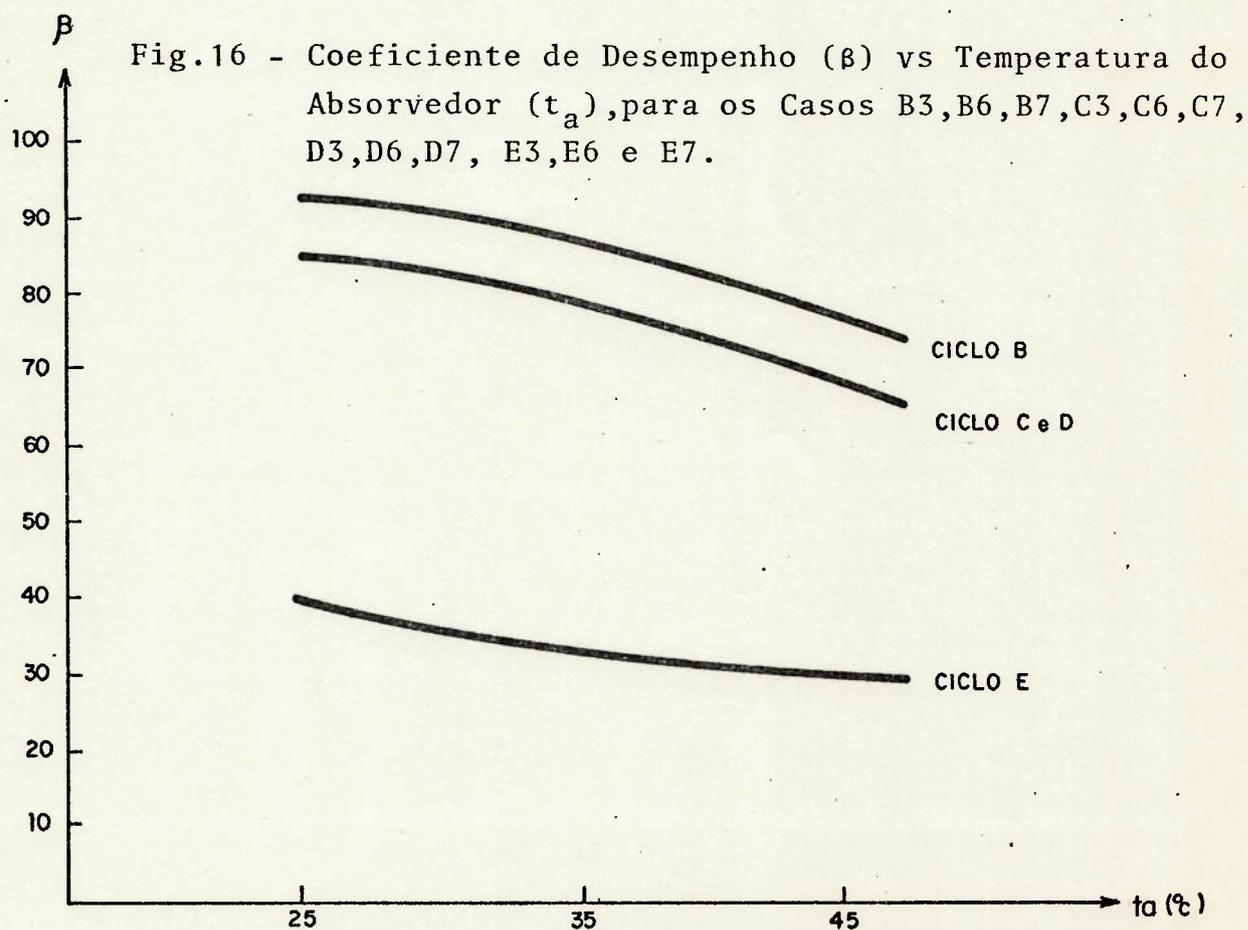
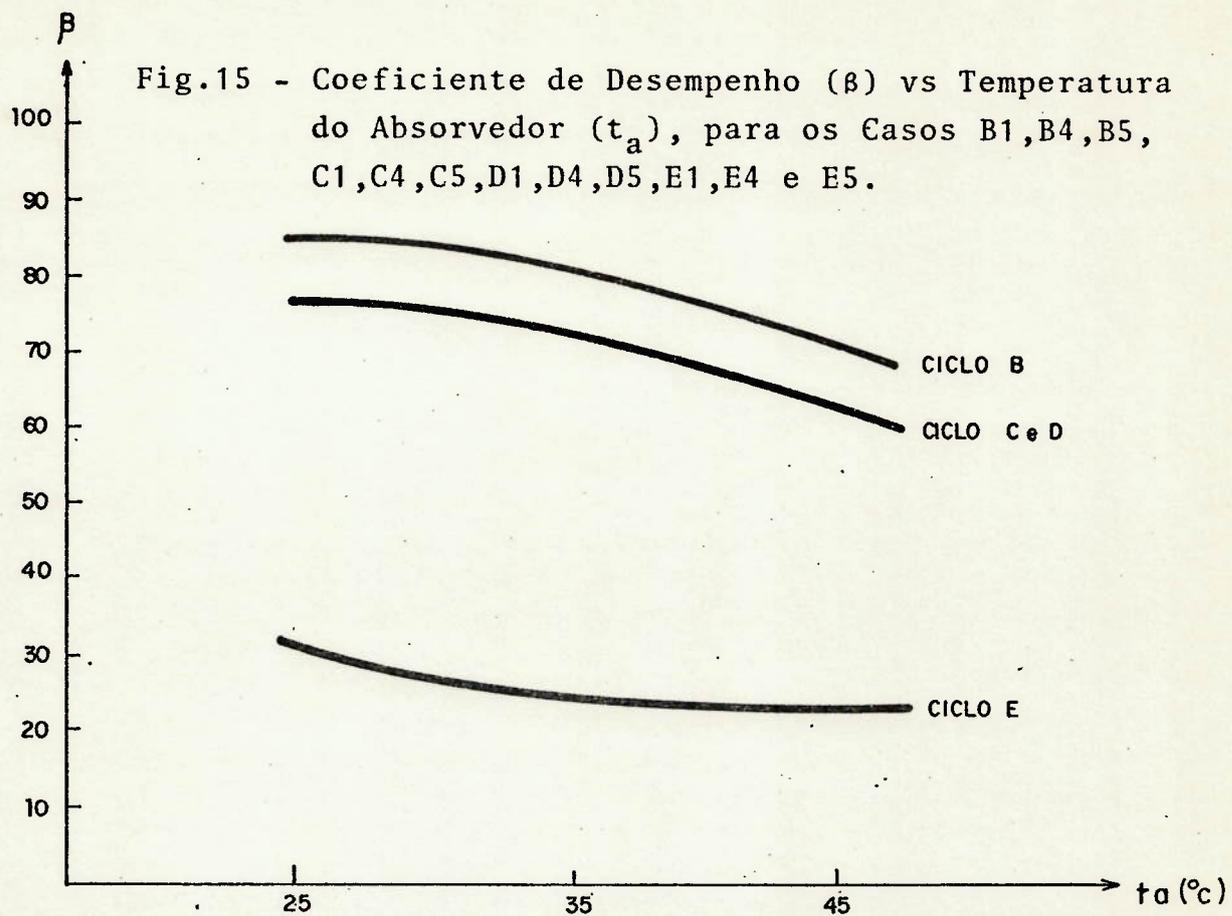
- A temperatura do absorvedor aumenta. Ver figuras 30 e 31
- A temperatura do condensador aumenta. Ver figura 32

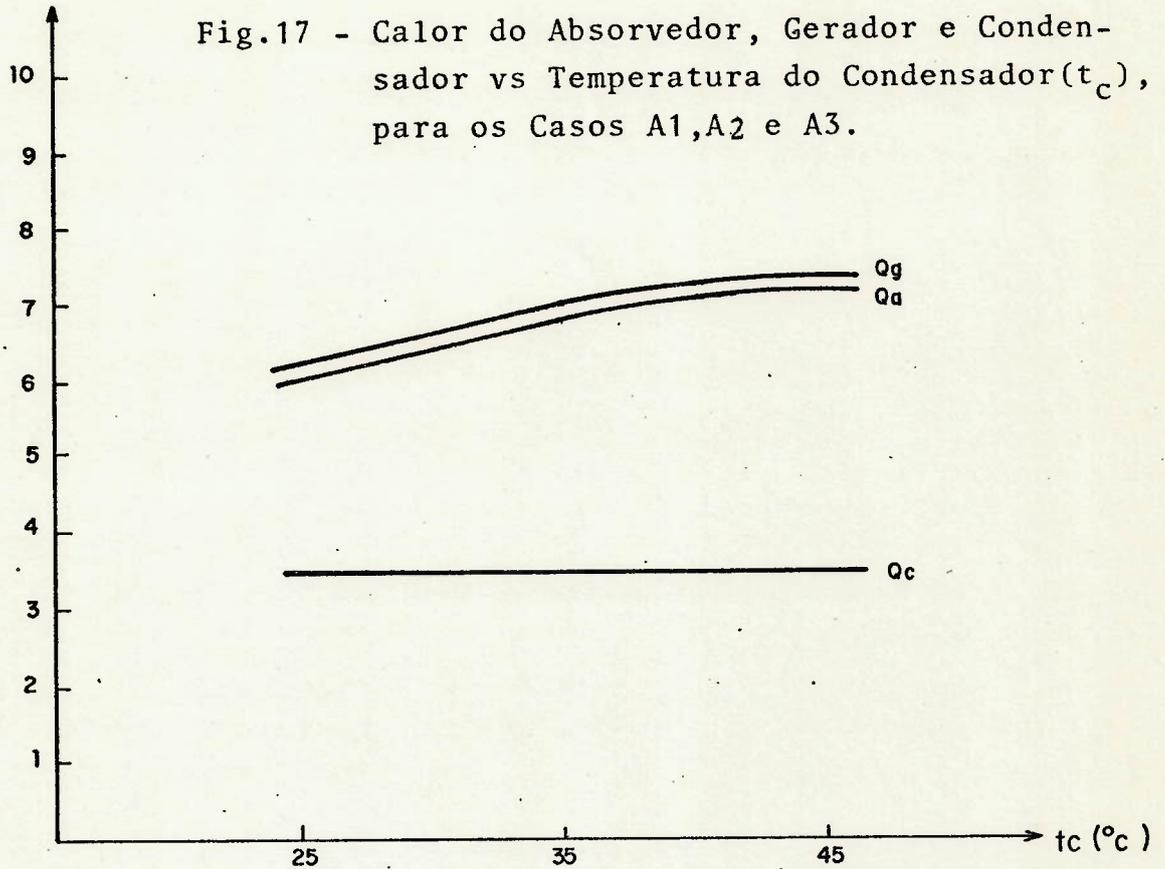
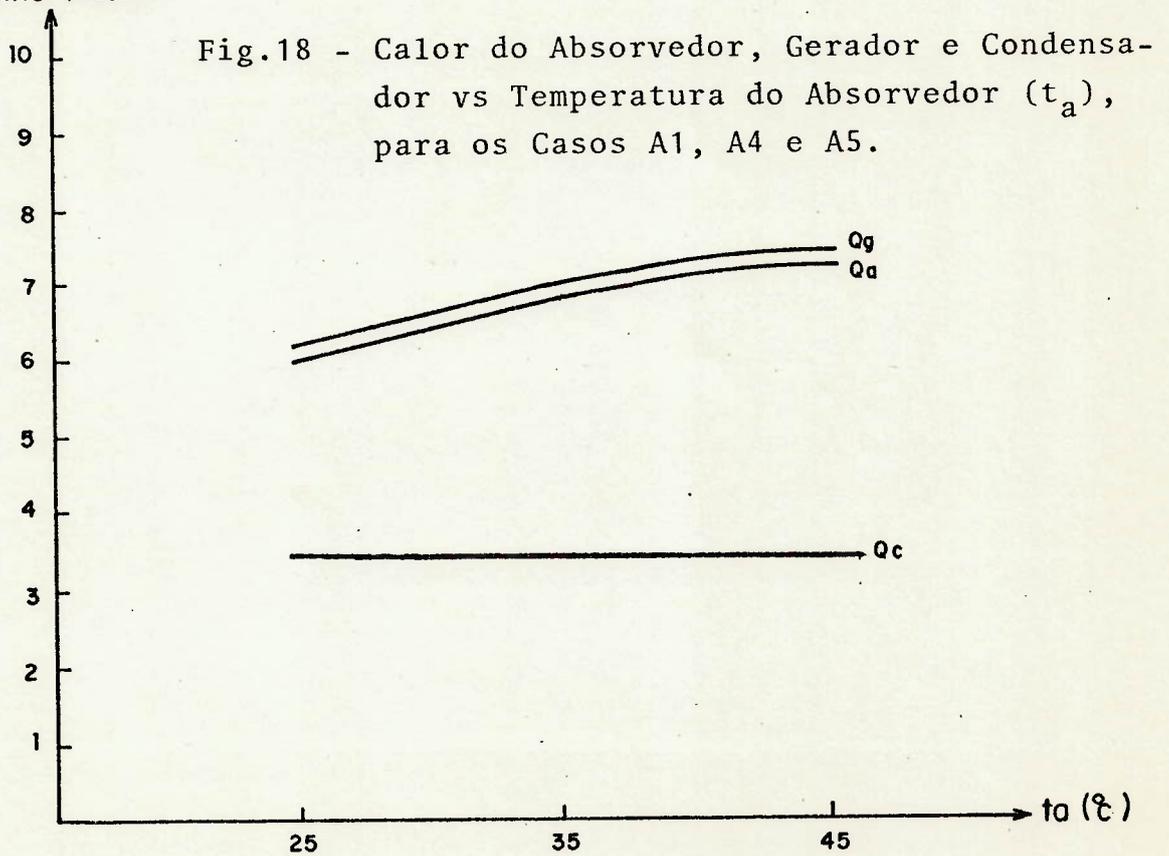
O calor a ser removido do absorvedor se reduz -  
quando a diferença de concentrações dos licores aumenta. Ver  
figura 34.

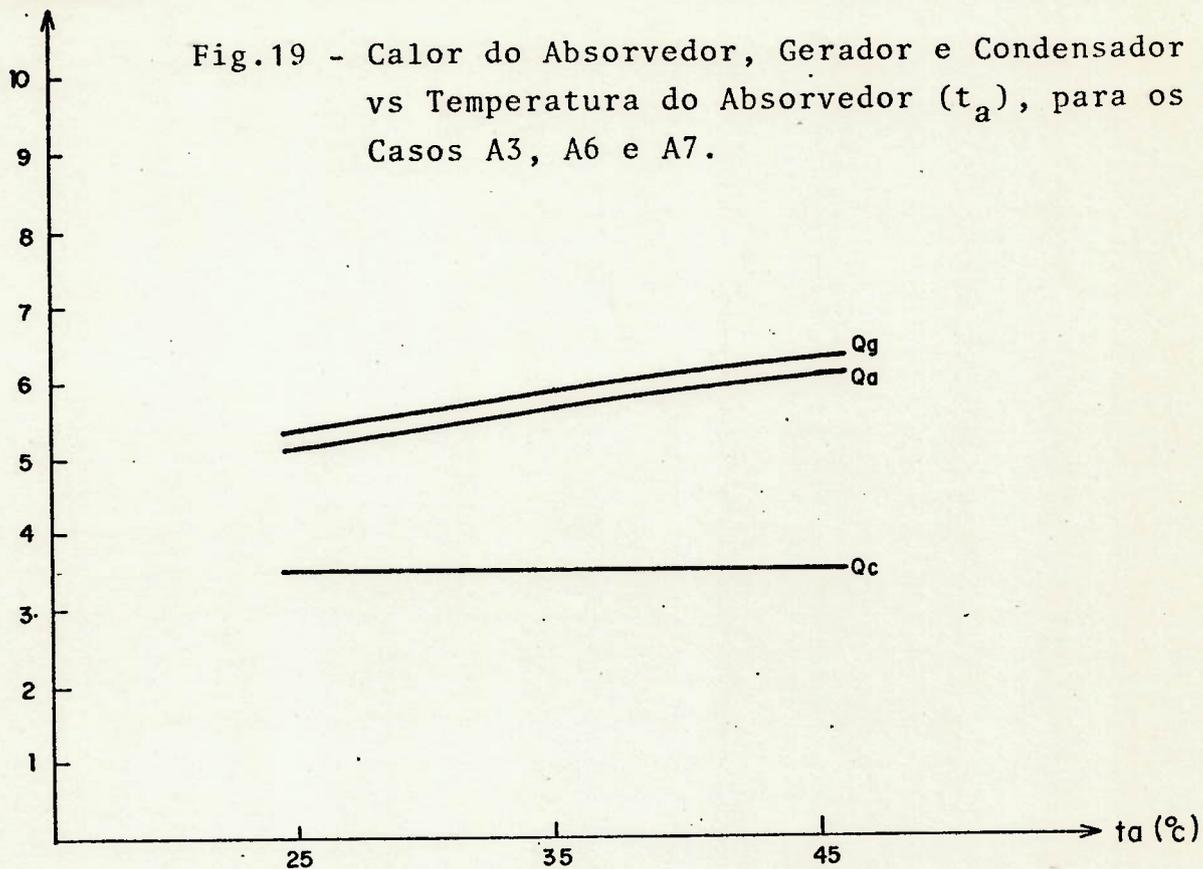
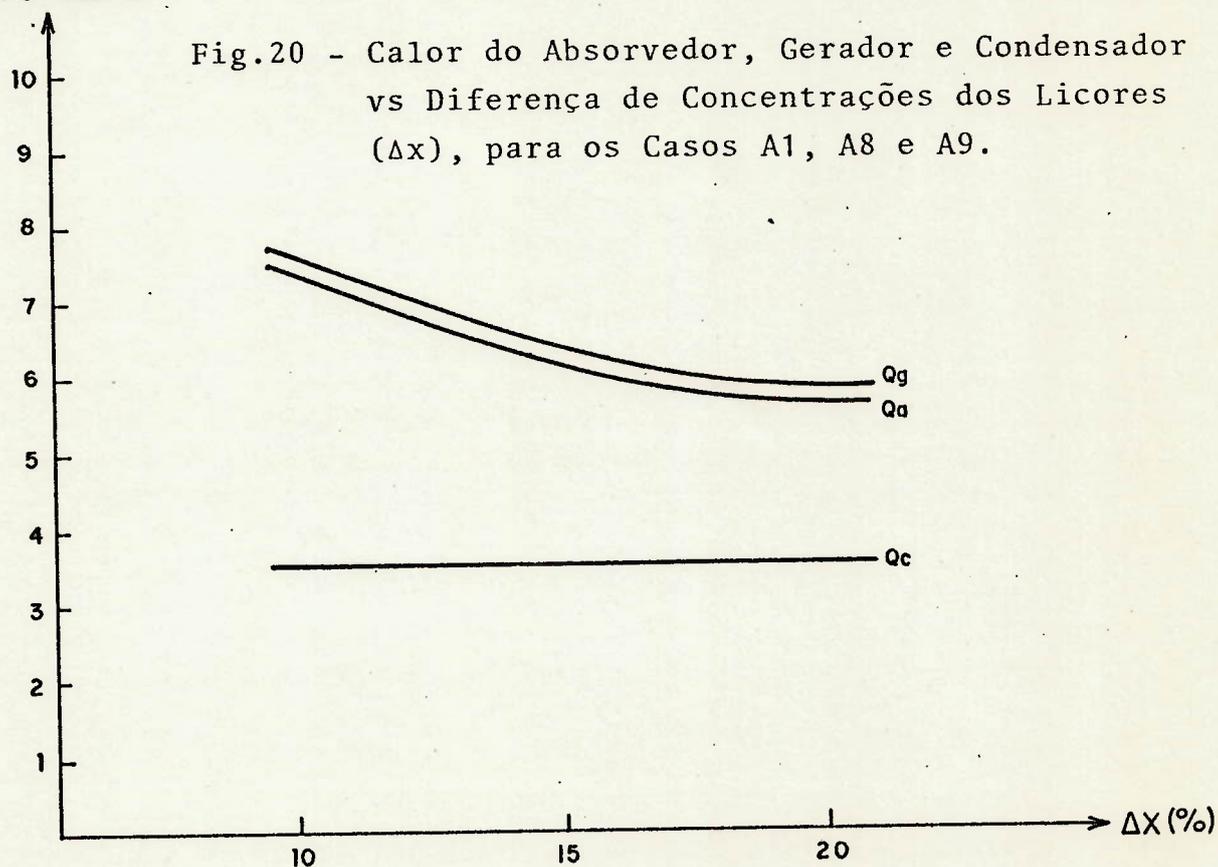




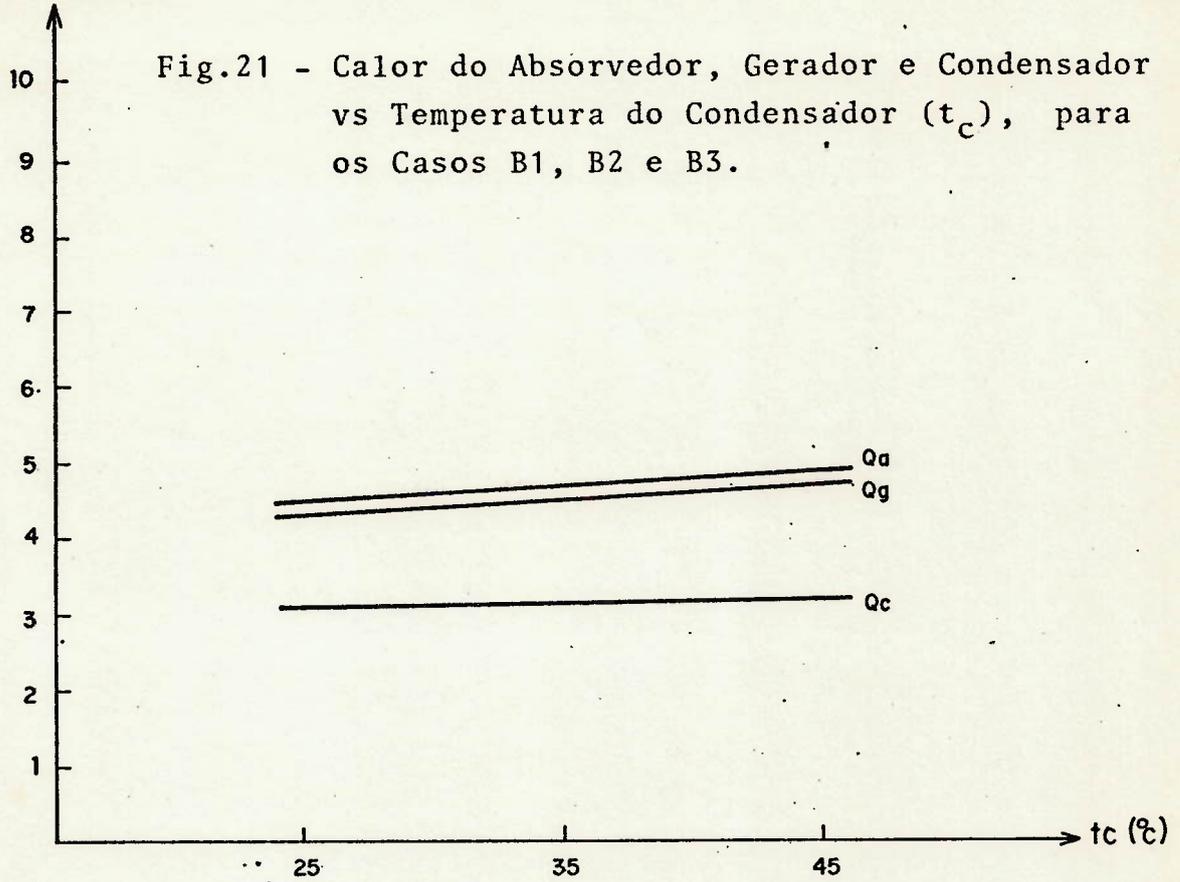




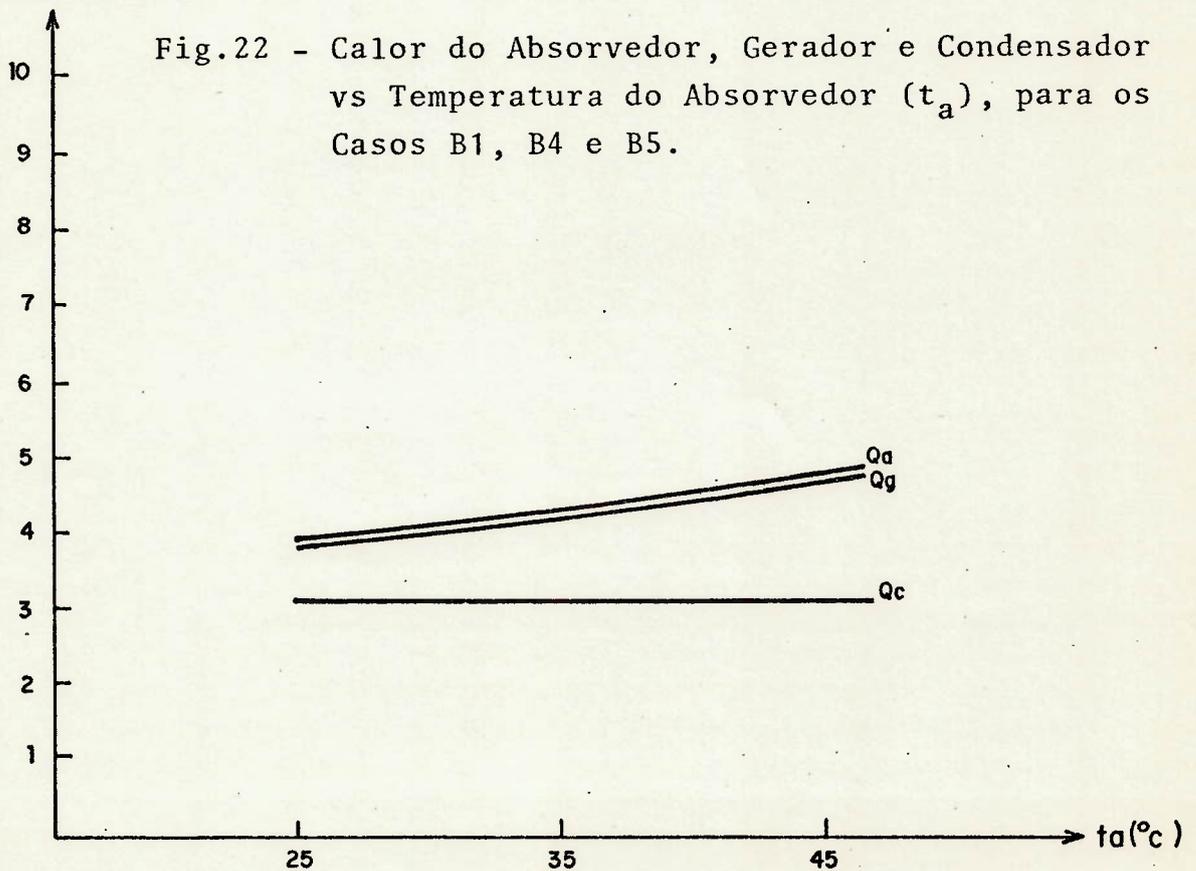
$Q \times 10^3 \text{ (Kcal/h)}$ 

 $Q \times 10^3 \text{ (Kcal/h)}$ 


$Q \times 10^3 \text{ (Kcal/h)}$ 

 $Q \times 10^3 \text{ (Kcal/h)}$ 


$Q \times 10^3$  (Kcal/h)

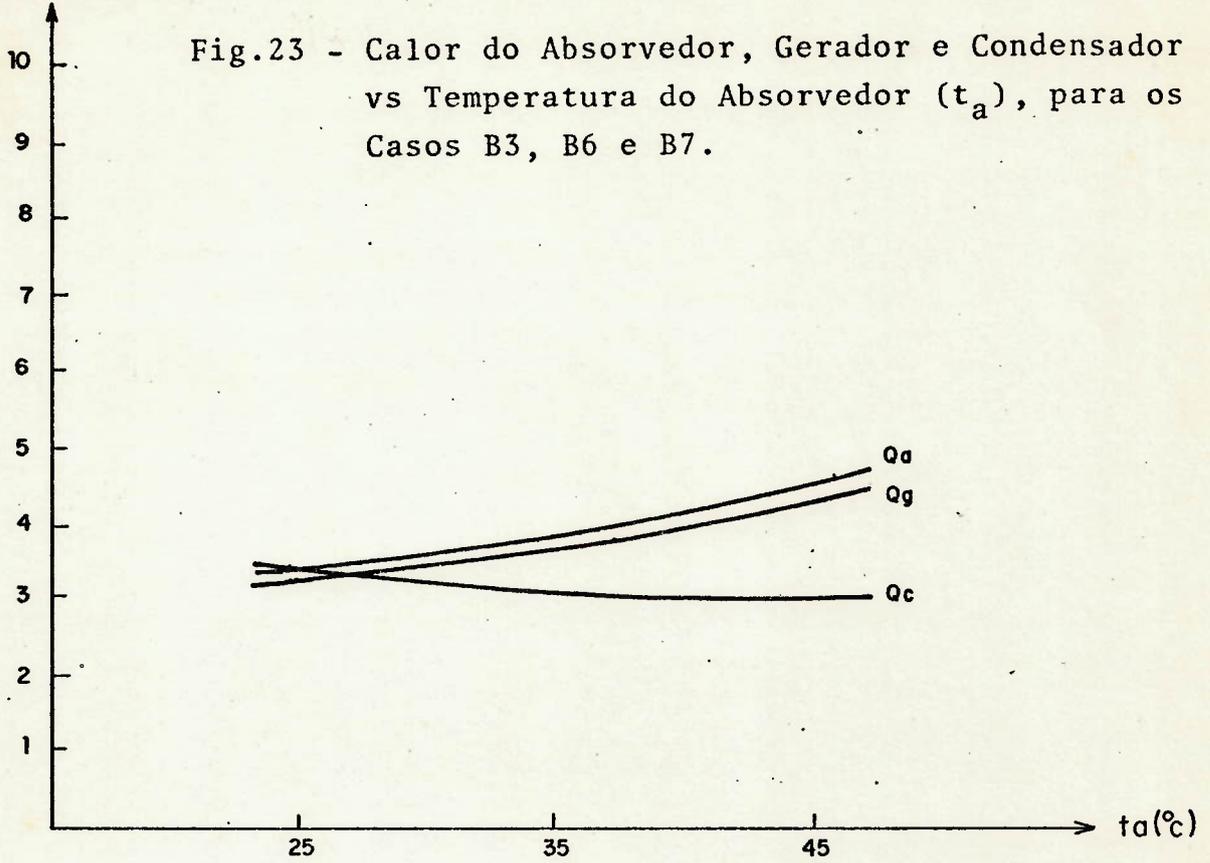


$Q \times 10^3$  (Kcal/h)



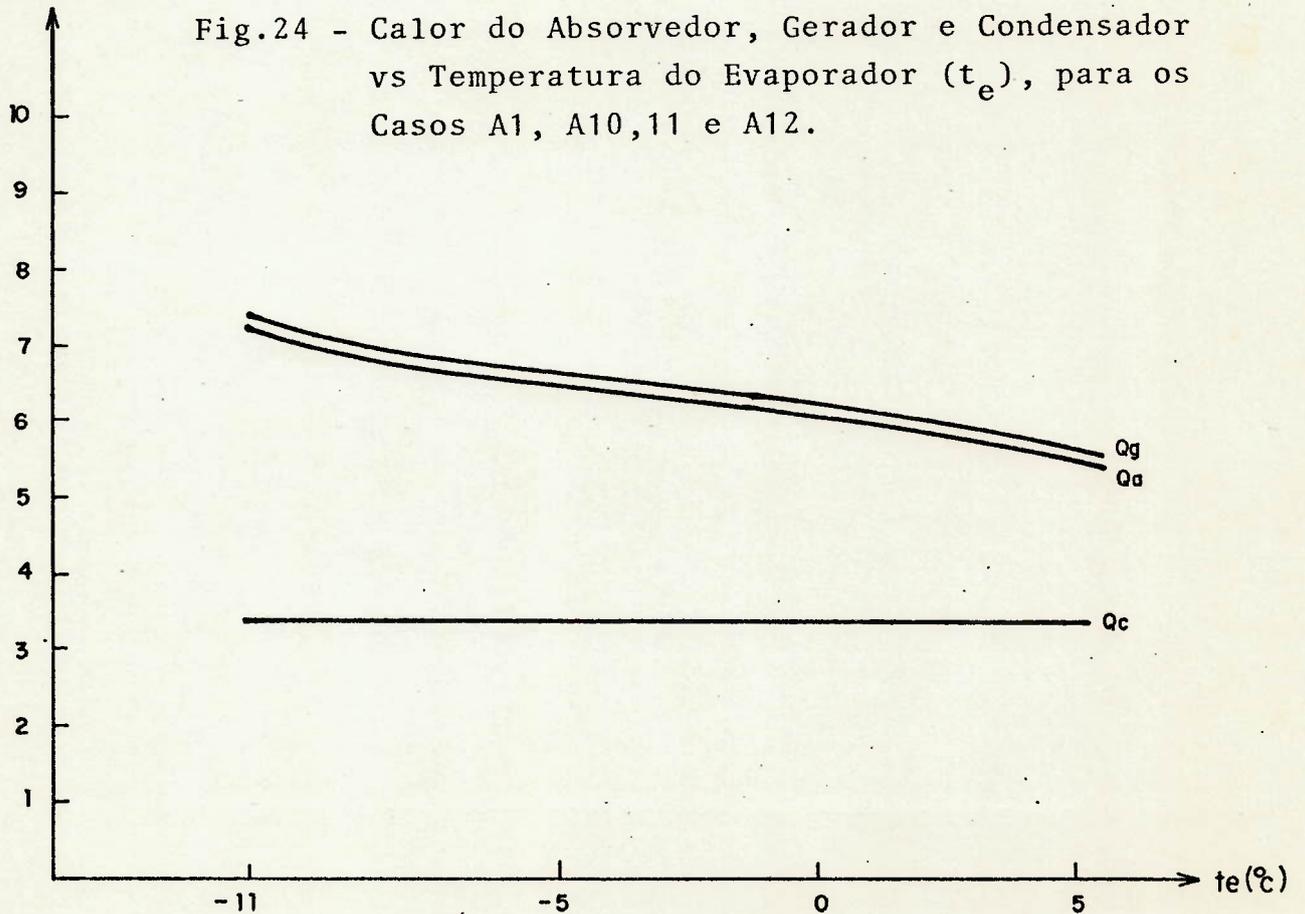
$Q \times 10^{-3}$  (Kcal/h)

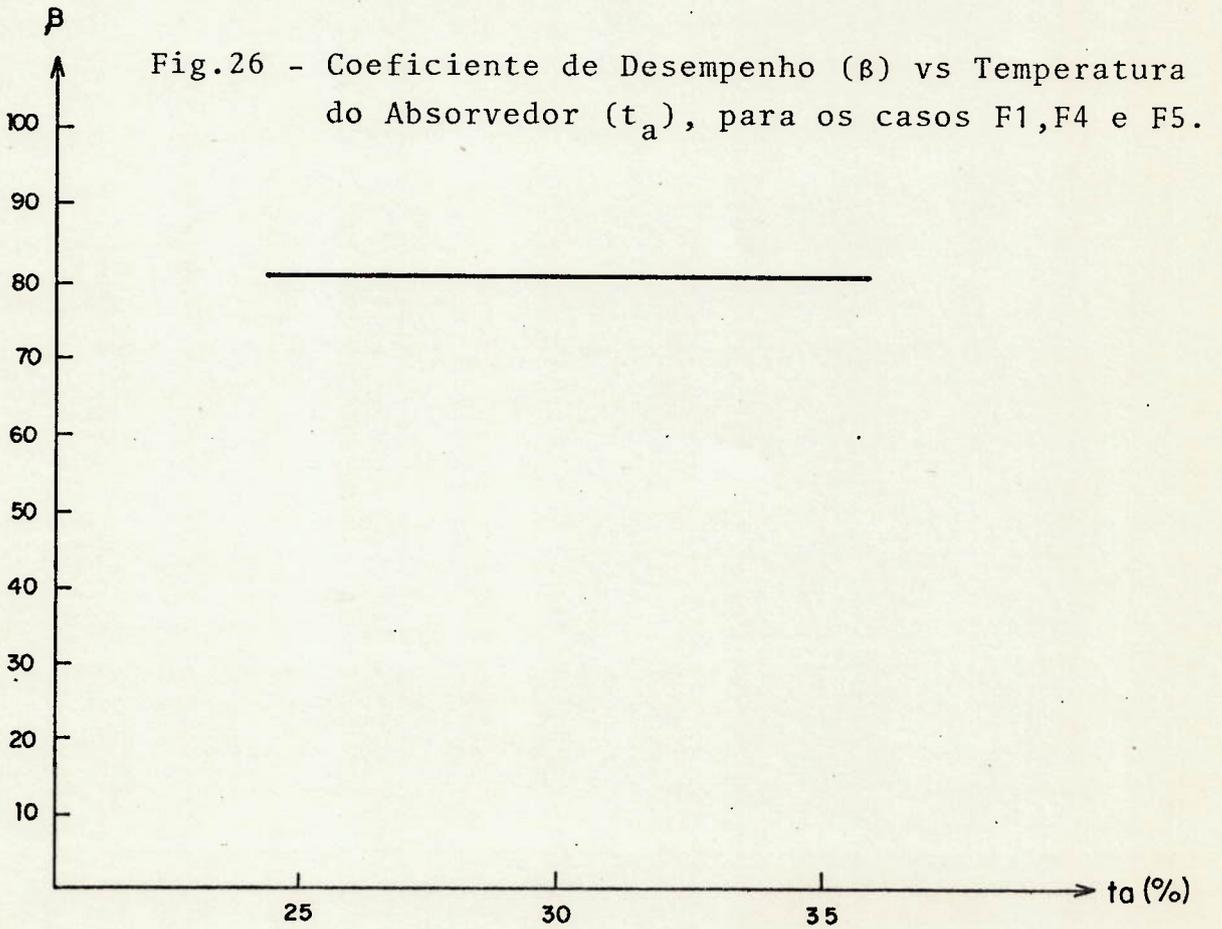
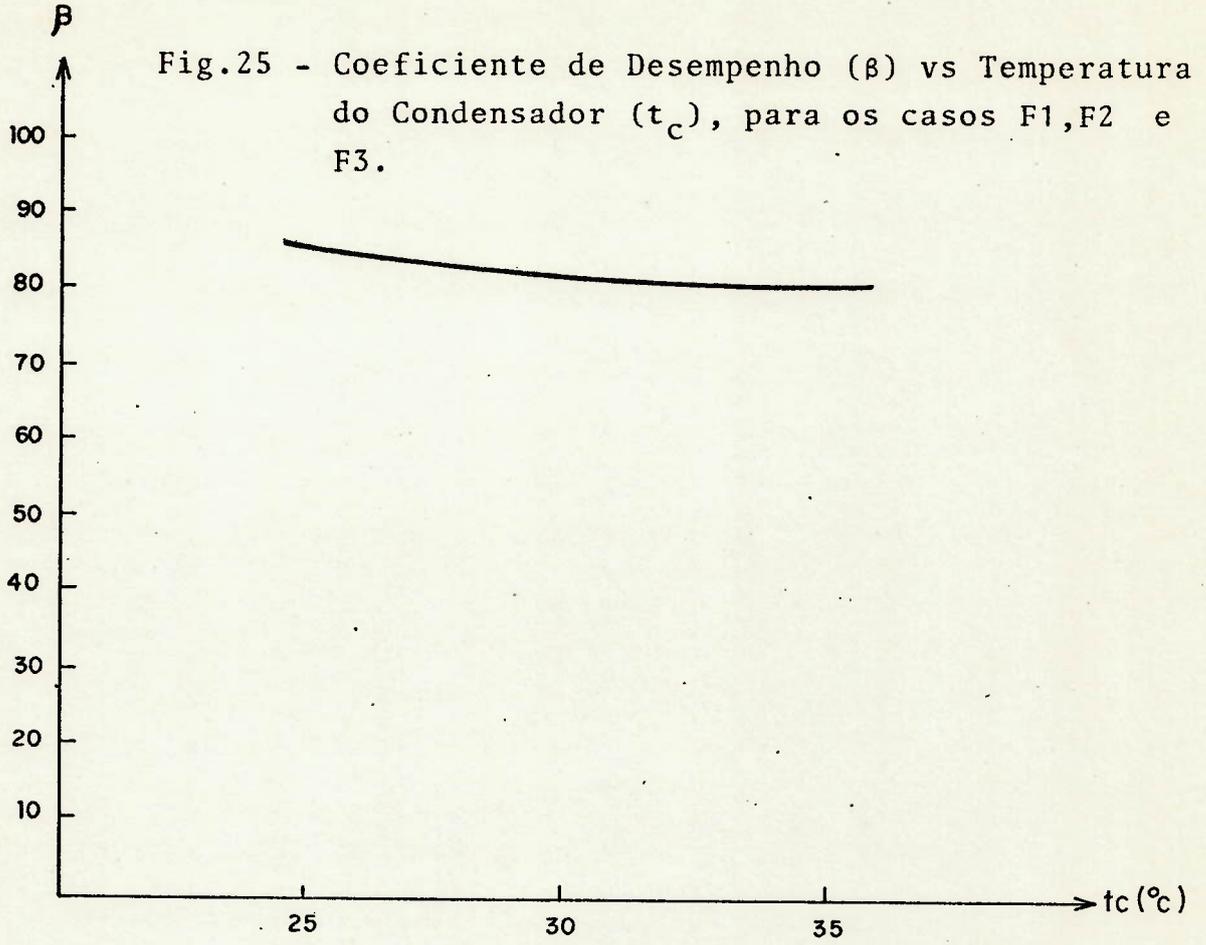
Fig.23 - Calor do Absorvedor, Gerador e Condensador vs Temperatura do Absorvedor ( $t_a$ ), para os Casos B3, B6 e B7.

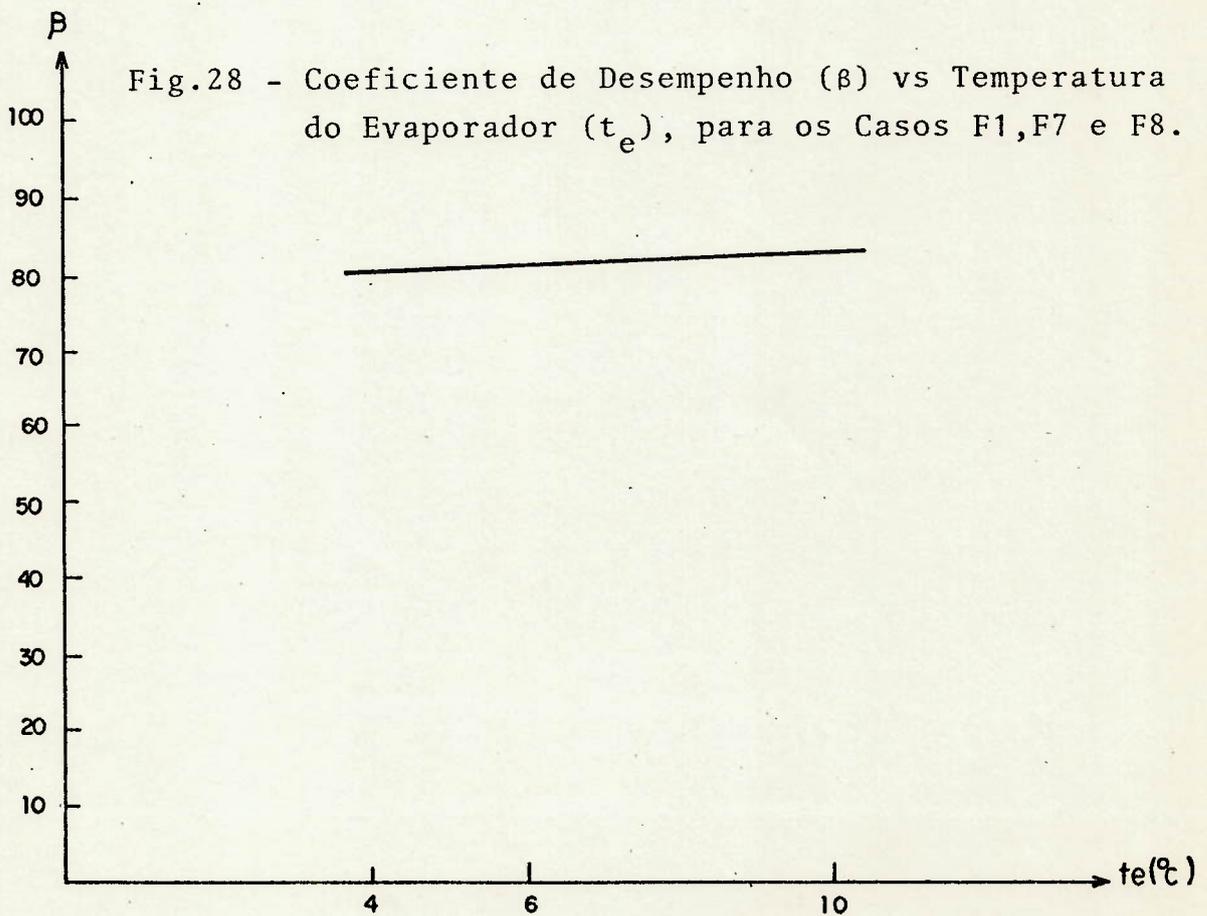
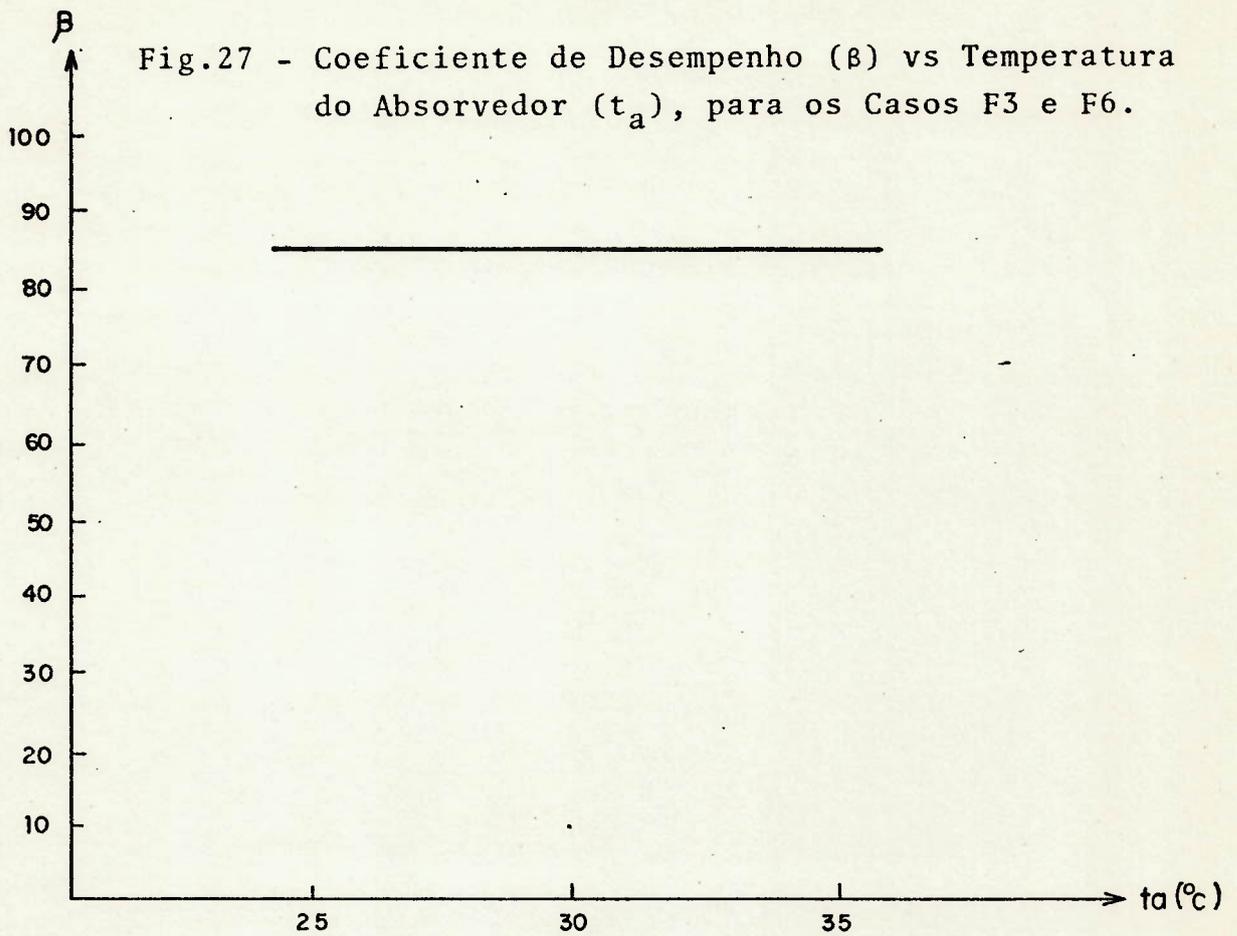


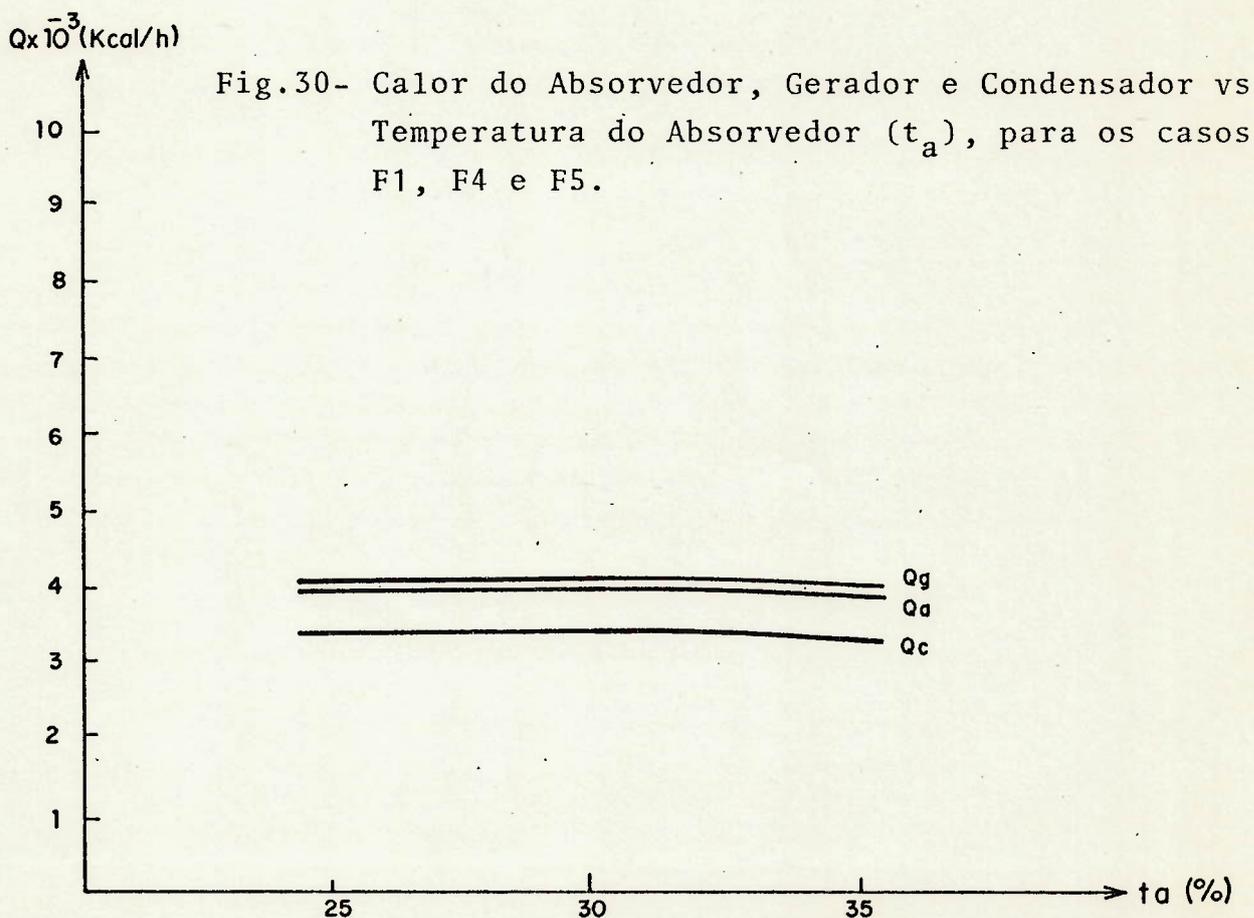
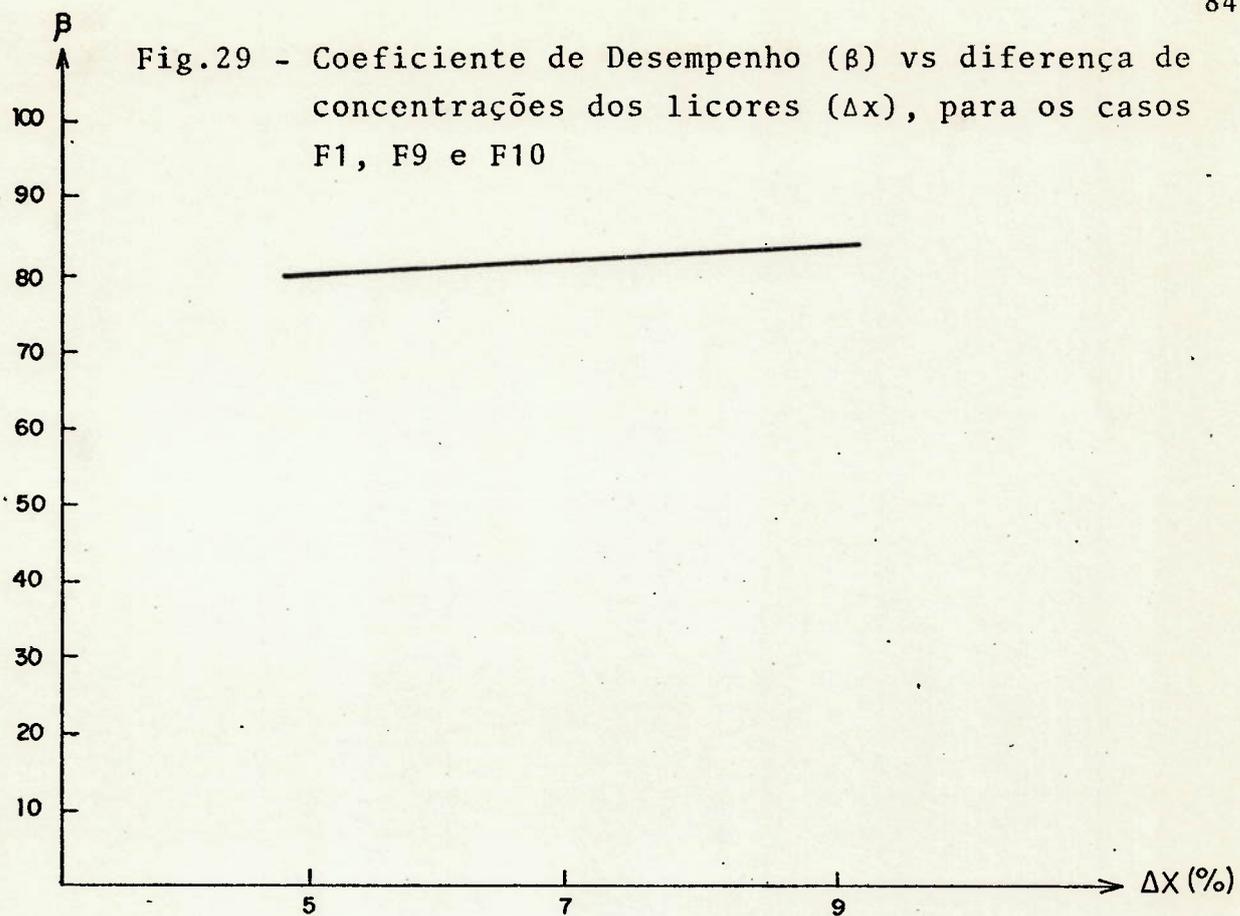
$Q \times 10^{-3}$  (Kcal/h)

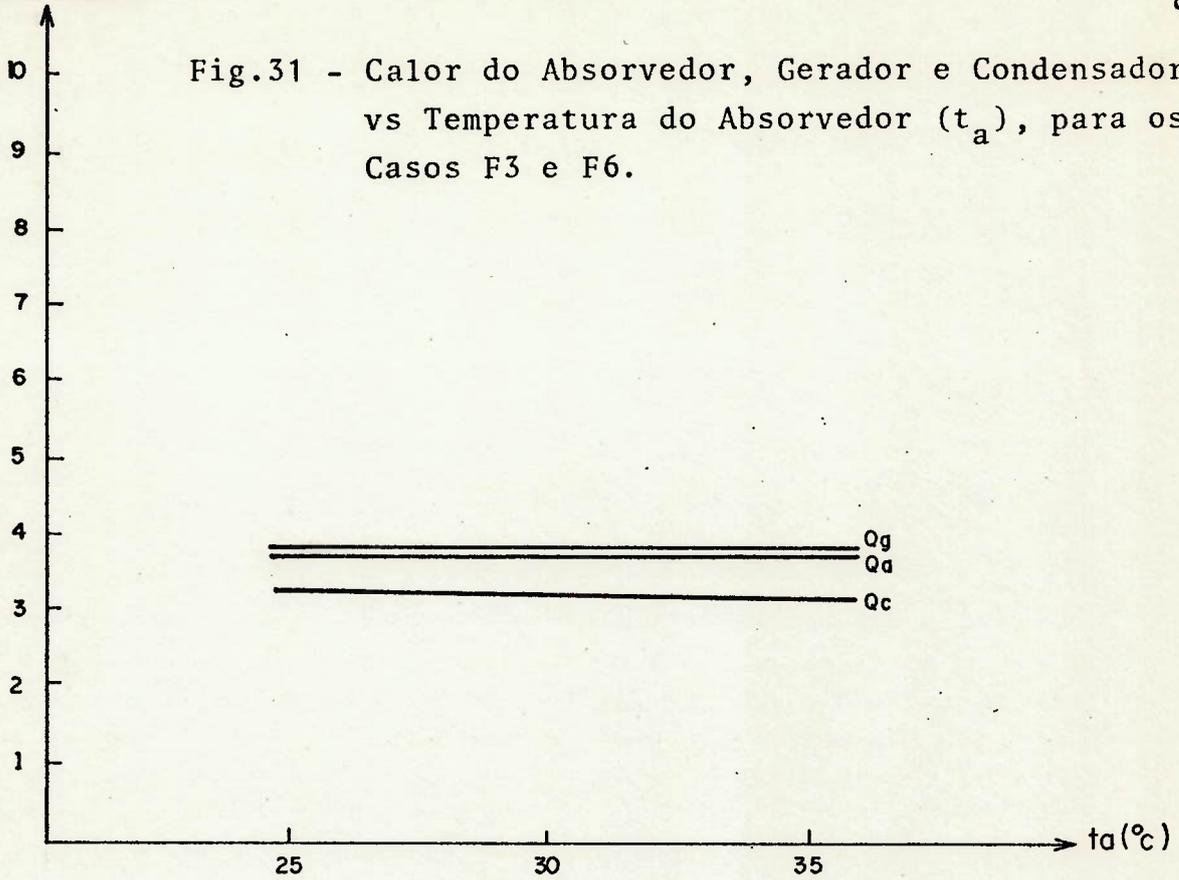
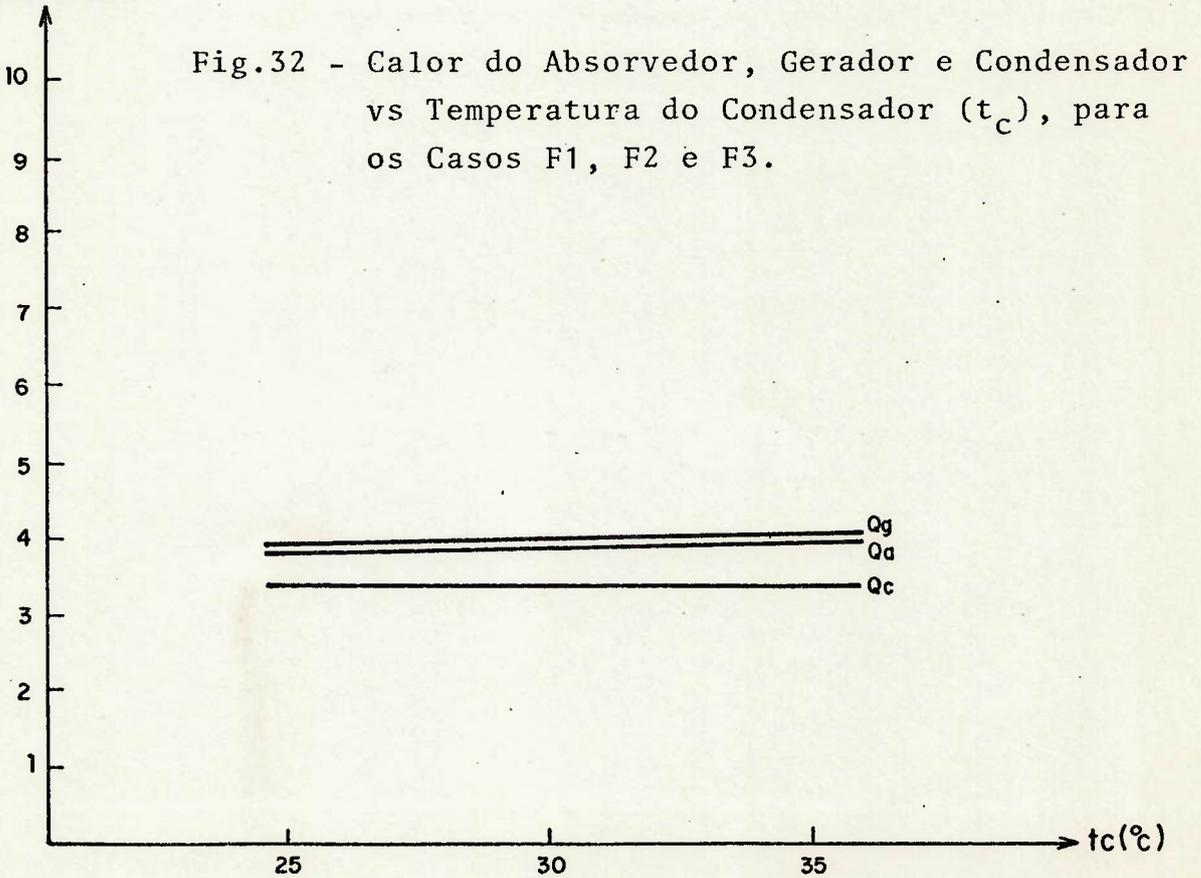
Fig.24 - Calor do Absorvedor, Gerador e Condensador vs Temperatura do Evaporador ( $t_e$ ), para os Casos A1, A10, 11 e A12.









$Q \times 10^3 \text{ (Kcal/h)}$ 

 $Q \times 10^3 \text{ (Kcal/h)}$ 


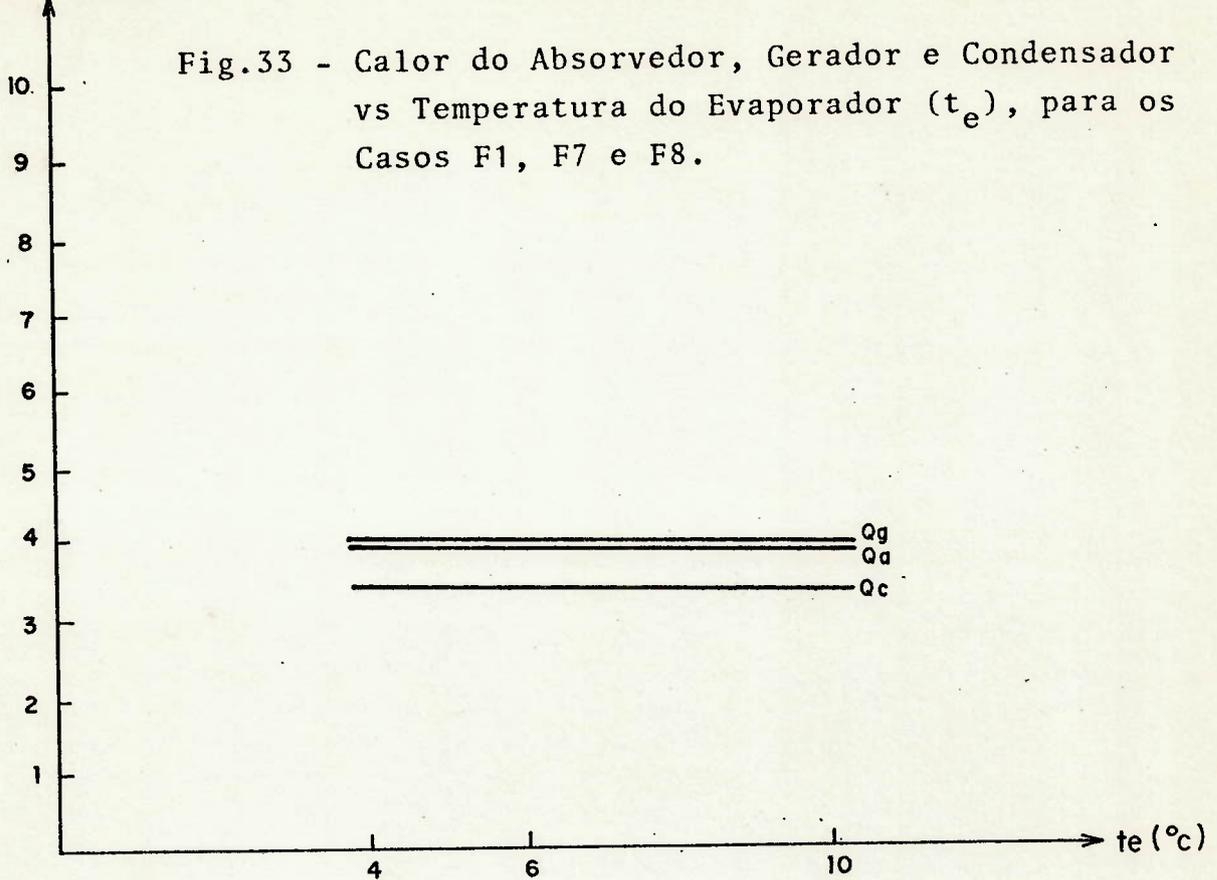
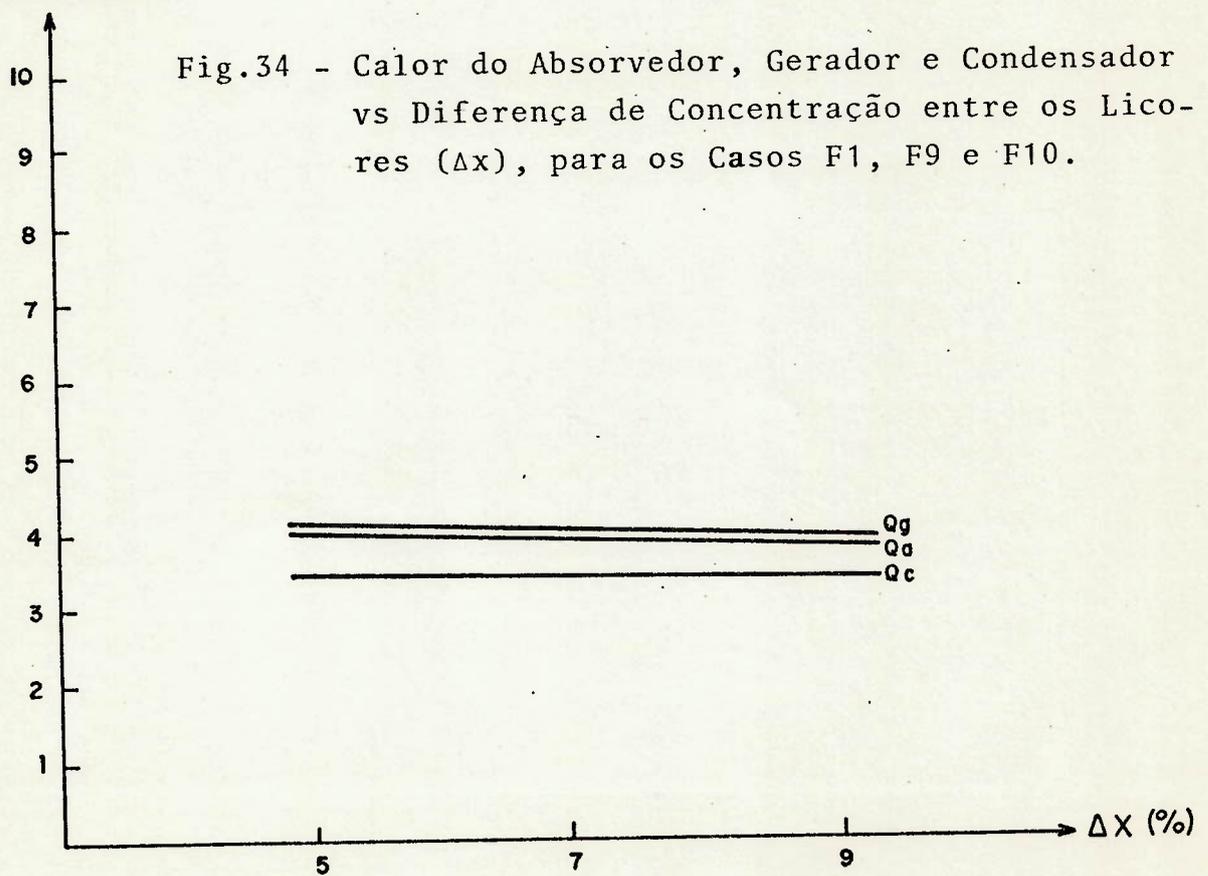
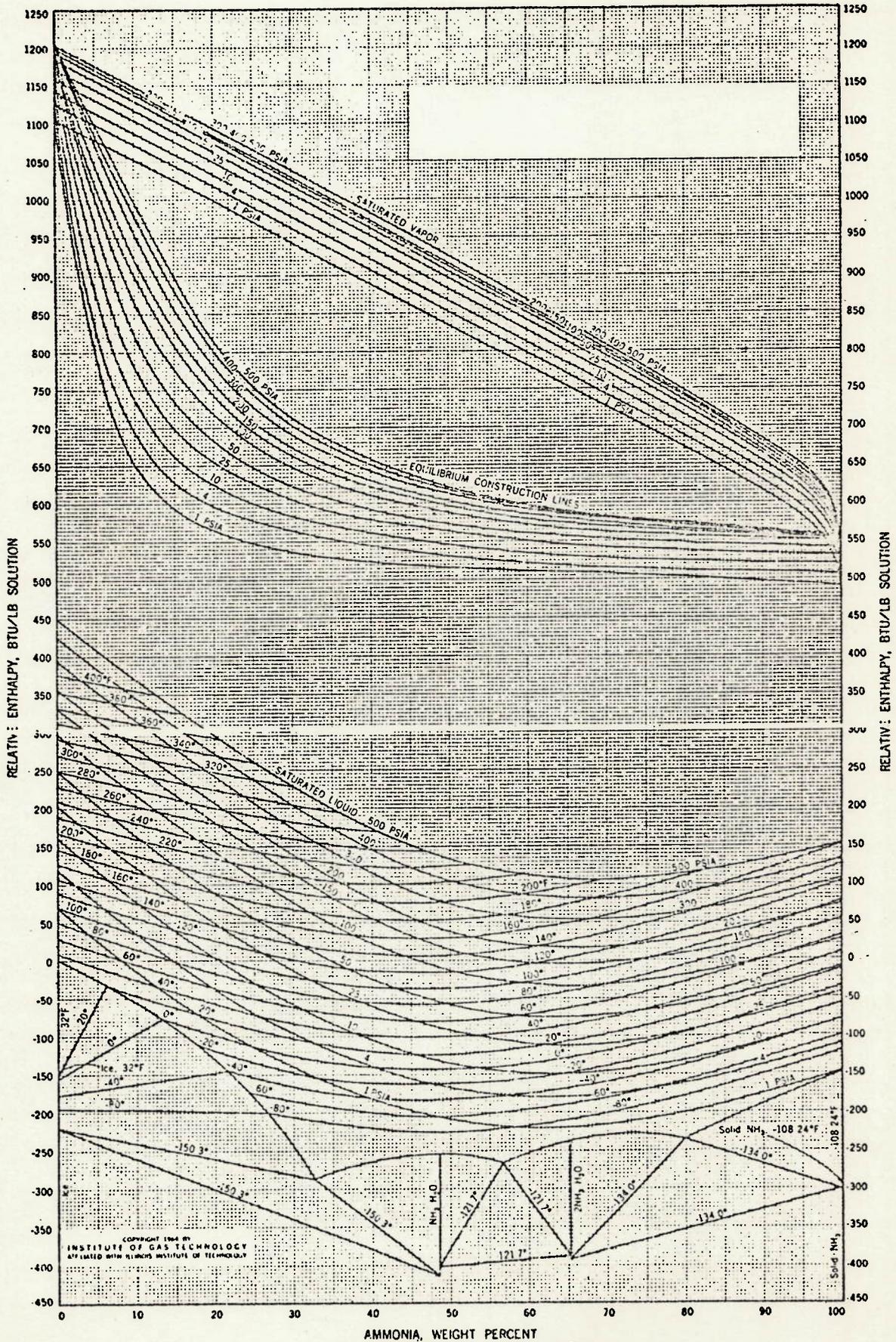
$Q \times 10^3 \text{ (Kcal/h)}$ 

 $Q \times 10^3 \text{ (Kcal/h)}$ 


Fig.35 - Diagrama de Entalpia versus Concentração para mistura Amônia e Água. Do ASHRAE [1].



• Reprinted by permission from Institute of Gas Technology and the American Gas Association © 1964.

Fig.36 - Ábaco de Equilíbrio para Solução Aquosas de Brometo de Lítio. Do ASHRAE [1].

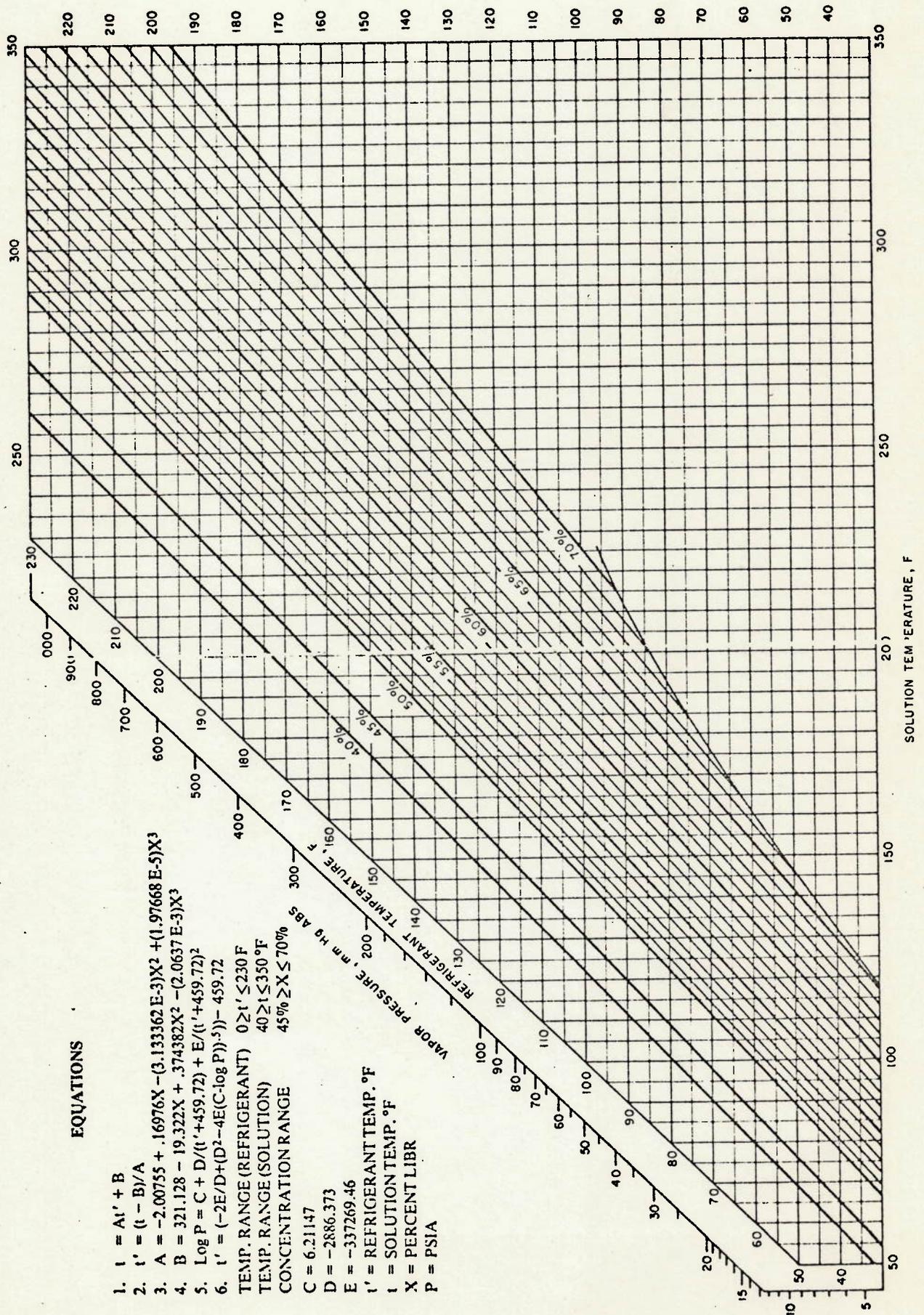
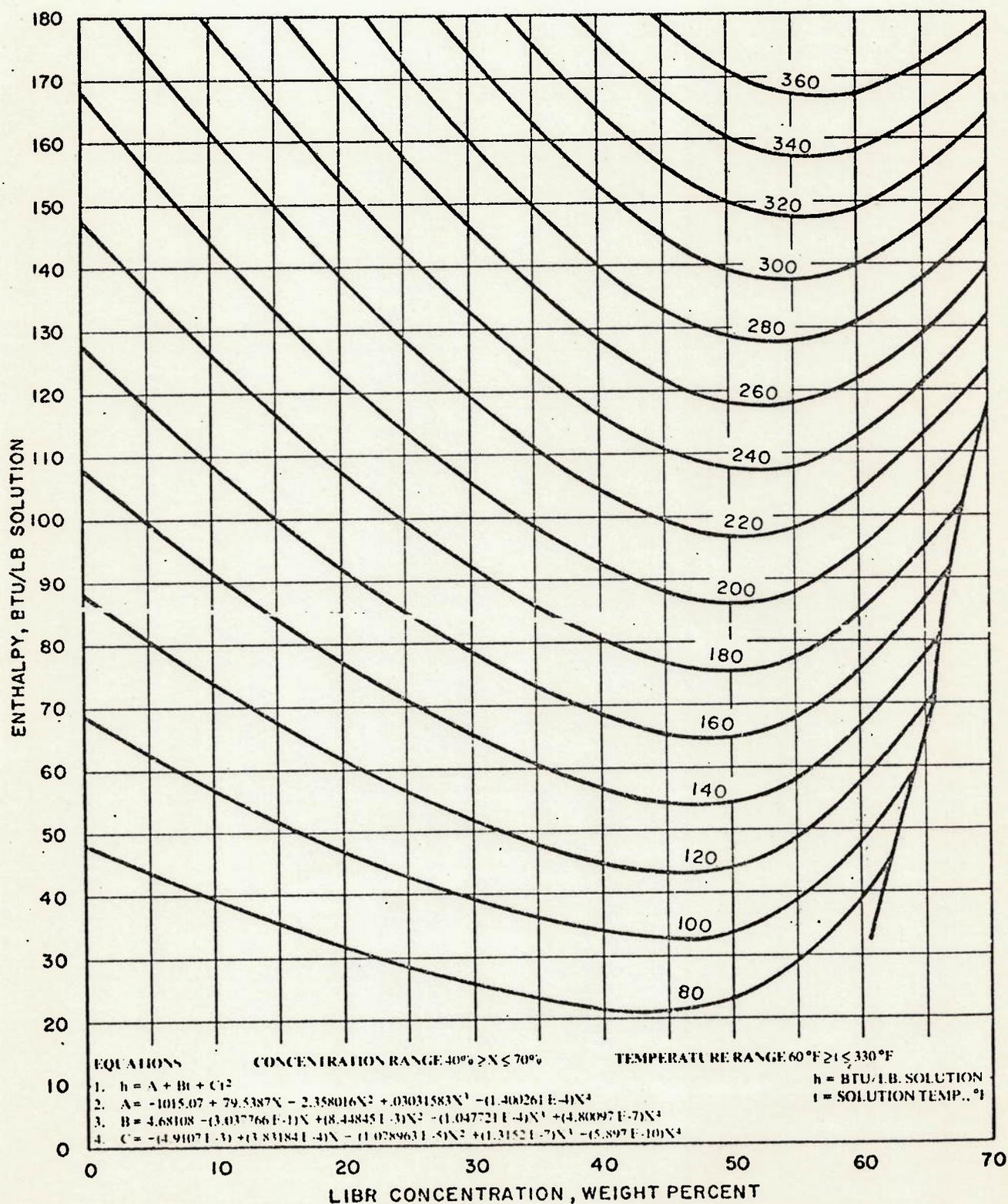


Fig.37 - Diagrama de Entalpia versus Concentração para Combinações de Brometo de Lítio e Água. Do ASHRAE [1].



#### 4 - DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

##### 4.1 - Ciclos de absorção de amônia e água e de água e brometo de lítio.

Conforme descrito no item 3.2, o coeficiente de desempenho e o calor trocado nos equipamentos variam em função de alguns parâmetros. Assim sendo, neste item é exposta a razão destas variações.

##### 4.1.1 - O coeficiente de desempenho aumenta quando:

1- A temperatura do evaporador se eleva - porque o calor a ser fornecido para o gerador é menor devido à redução dos seguintes parâmetros:

- vazão do refrigerante e dos licores, pelo fato da entalpia do vapor do refrigerante que sai do evaporador (ponto 12), ser maior.
- entalpia do licor fraco que sai do trocador de calor dos licores (ponto 2), porque a entalpia do licor fraco que entra no trocador de calor dos licores é menor pela maior concentração do licor fraco no gerador.

2- A diferença de concentrações aumenta - porque o calor a ser fornecido para o gerador é menor devido à redução dos seguintes parâmetros:

- Vazão dos licores, devido à redução das vazões relativas causada pelo aumento da diferença de concentração
- Entalpia do licor fraco que sai do trocador de calor nos licores (ponto 2) porque apesar da entalpia do licor fraco que entra no trocador de calor dos licores (ponto 1), ser mais elevada, as vazões relativas são menores.

3- A temperatura do condensador se reduz porque o calor a ser fornecido ao gerador é menor devido à redução dos seguintes parâmetros:

- Entalpia do refrigerante líquido antes do condensador (ponto 8), devido à temperatura do condensador ser menor;
- Entalpia do licor fraco na saída do trocador de calor dos licores (ponto 2), porque a entalpia do licor fraco na entrada deste trocador (ponto 1) é menor devido a pressões menores no gerador.

4- A temperatura do absorvedor se reduz porque o calor a ser fornecido no gerador é menor devido à redução dos seguintes parâmetros:

- Vazão dos licores devido as vazões relativas serem menores;

- Entalpia do licor forte que sai do absorvedor (ponto 4), por causa da redução da temperatura do absorvedor;
- Entalpia do licor fraco que entra no absorvedor (ponto 2), porque a entalpia do licor fraco entra no trocador de calor dos licores (ponto 1) é menor devido à redução das vazões relativas.

4.1.2 - O calor a ser removido no condensador se reduz com o aumento da temperatura do evaporador porque a vazão de refrigeração é menor.

4.1.3 - O calor a ser fornecido ao gerador aumenta quando:

1- A temperatura do condensador aumenta porque a vazão do refrigerante e as vazões dos licores são maiores, e a entalpia do vapor do refrigerante que sai do gerador (ponto 8) aumenta com a elevação da temperatura do condensador.

2- A temperatura do absorvedor aumenta devido à entalpia do licor fraco que entra no absorvedor se elevar com o aumento da temperatura do absorvedor.

4.1.4 - O calor a ser fornecido ao gerador se reduz quando:

1- A diferença de concentrações entre os licores se eleva, devido à vazão dos licores ser menor e a entalpia do licor fraco na saída do trocador de calor dos licores (ponto 2) também se reduzir.

2- A temperatura do evaporador se eleva, porque a vazão dos licores diminui, e a entalpia do licor fraco que sai do trocador de calor dos licores (ponto 2) também diminui por causa da redução da concentração no gerador.

4.1.5 - O calor a ser removido do condensador aumenta com a elevação da temperatura do condensador devido ao aumento da vazão de refrigerante, apesar da redução do calor latente do refrigerante.

4.1.6 - O calor a ser removido do condensador se mantém constante com a variação da temperatura do absorvedor e com a variação da diferença de concentrações, devido à não alteração da vazão do refrigerante e do calor latente do refrigerante.

4.1.7 - O calor a ser removido do absorvedor aumenta quando:

1- A temperatura do condensador se eleva, devido ao fato de o calor a ser removido do absorvedor ser função do balanço térmico, que engloba os calores do gerador, evaporador e condensador. E com essa elevação de temperatura o calor a ser fornecido ao gerador também se eleva, apesar do aumento do calor a ser removido do condensador.

2- A temperatura do absorvedor se eleva devido ao aumento do calor a ser fornecido ao gerador e a redução do calor a ser removido do condensador. Com relação à influência dos equipamentos complementares no ciclo de absorção amônia e água, têm-se as seguintes conclusões:

4.1.8 - Para as mesmas condições o ciclo C, que equivale ao ciclo B sem o pré-resfriador, apresenta um coeficiente de desempenho menor que a do ciclo B. Isto é devido ao aumento da vazão de refrigerante e da vazão dos licores, causados pela elevação da entalpia antes do evaporador com a retirada do pré-resfriador. A implicação disso é o aumento do calor a ser fornecido ao gerador.

4.1.9 - Para as mesmas condições o ciclo D, que equivale ao ciclo C, sem a serpentina de fundo do gerador, apresenta um coeficiente de desempenho igual ao do ciclo C. Isto é devido ao fato de as vazões serem iguais, e a entalpia dos seguintes pontos:

- . licor fraco que sai no trocador de calor dos licores (ponto 2)
- . licor forte que sai do absorvedor (ponto 4)
- . vapor do refrigerante que sai do gerador (ponto 8)

serem iguais em ambos os ciclos, conseqüentemente o calor do gerador ser o mesmo.

4.1.10- Para as mesmas condições, o ciclo E, que equivale ao ciclo D sem a serpentina superior do gerador e o trocador de calor dos licores, apresenta um coeficiente de desempenho menor do que o do ciclo D. Isto é devido ao grande aumento da entalpia do licor fraco que entra no absorvedor (ponto 2), porque o trocador de calor dos licores não existe.

#### 4.2 - Comparação entre os ciclos de absorção de amônia e água e de água e brometo de lítio.

As vantagens dos ciclos de absorção de amônia e água em relação aos ciclos de absorção de água e brometo de lítio, são as seguintes:

- Podem operar com temperaturas no evaporador abaixo de  $0^{\circ}\text{C}$ , já que o refrigerante é amônia e não água, que tem mais baixa temperatura de evaporação;

- Podem ser resfriados com ar, porque não têm a restrição dos ciclos de água e brometo de lítio no absorvedor, que é a de ter que operar com temperaturas inferiores a  $35^{\circ}\text{C}$  para não ocorrer cristalização;

- O seu licor tem baixa viscosidade

As desvantagens dos ciclos de absorção de amônia e água em relação aos ciclos de absorção de água e brometo de lítio, são as seguintes:

- A sua toxicidade, porque pelo Código ANSB9 "Safety Code Group 2", a amônia tem o seu uso restrito dentro de residências.

- O coeficiente de desempenho é mais baixo, para as mesmas condições;

- As pressões de operação são bem mais elevadas;

- Os ciclos com água e brometo de lítio, tem maior segurança, mais alta proporção de volatilidade, mais alta afinidade e mais alto calor latente.

- Tem vazão de refrigerante e vazões de licores forte e fraco mais elevadas, para as mesmas condições de carga térmica requerida;

- Necessita temperaturas no gerador mais elevadas;

- O calor a ser fornecido ao gerador é mais elevado;

- A variação entálpica dos fluídos no trocador de calor dos licores é mais elevada;

- O calor a ser removido no absorvedor é mais elevado;

- Requer uma coluna retificadora para evitar a entrada de água no circuito refrigerante, o que provocaria formação de gelo.

Assim sendo, os ciclos de absorção de água e brometo de lítio, são mais utilizados para aplicações de ar condicionado, basicamente devido a sua não toxicidade e ao fato de operar com temperaturas no evaporador acima de 0°C. Já os ciclos de amônia e água são mais utilizados para aplicações industriais que requeiram baixas temperaturas.

#### 4.3 - Fontes Energéticas Empregadas nos Ciclos.

##### 4.3.1 - Generalidades.

Dentre as várias fontes energéticas que podem ser empregadas nos ciclos de refrigeração por absorção, pode-se citar: elétrica, biomassa, solar, derivados de petróleo, etc.

##### - Energia elétrica

Pode ser utilizada para fornecer calor ao gerador através de uma resistência elétrica, e também conforme o ciclo, fornecer trabalho à bomba de licor forte. A utilização da energia elétrica limita a aplicação do ciclo, para regiões onde a mesma esteja disponível.

##### - Energia biomassa

A energia de biomassa pode também ser aplicada para fornecer o calor ao gerador, através da queima direta da biomassa ou através da queima de um combustível gerado a partir de uma biomassa. Pode-se citar os seguintes: os processos de conversão da biomassa, pirólise, hidrogaseificação, hidrogenação, destilação destrutiva, hidrólise ácida, digestão anaeróbica, fermentação/destilação.

Esta fonte energética é mais aconselhável de se aplicar à ciclos que necessitem uma temperatura no gerador -

mais elevada, como no ciclo de absorção de amônia e água. Porque a temperatura normalmente obtida do processo de combustão é alta [6].

#### - Energia solar

A utilização da energia solar como fonte energética para sistemas de refrigeração tem um futuro promissor, porque combina uma grande disponibilidade desta , com aumento da demanda de sistemas de refrigeração. Diversas unidades de refrigeração por absorção, empregando energia solar tem sido construídas e operadas com sucesso, [5], [10],[11], [12] e [14], ver figura 38.

A limitação que estas unidades vem encontrando é o elevado custo dos coletores solares para altas temperaturas, os quais são requeridas nos ciclos de absorção, conforme descrito à seguir. Mas o aumento de mercado, tem levado países como os Estados Unidos e o Japão a desenvolverem sistemas, que sejam competitivos com os convencionais.

A energia solar pode ser essencialmente utilizada através de dois processos tecnológicos: helioelétrico e heliotérmico. O primeiro processo usa conversores fotovoltaicos, principalmente desenvolvidos pela indústria aeroespacial e agora pesquisados para usos terrestres, que convertem a radiação solar diretamente em eletricidade. Para o caso de ciclo de refrigeração os conversores fotovoltaicos poderiam acionar diretamente o motor elétrico de um ciclo comum de -

refrigeração de compressão a vapor. O segundo processo, que trata da conversão da radiação solar em calor, é o processo que será abordado neste estudo.

Os coletores solares são aparelhos idealizados para converter a energia solar radiante em calor. Foram desenvolvidas e estão em desenvolvimento, muitas variedades de coletores solares, segundo sua aplicação, temperatura atingida, materiais utilizados, fator de concentração, etc.

#### 4.3.2 - Utilização da energia solar no ciclo de absorção de água e brometo de lítio.

Nos ciclos de absorção de água e brometo de lítio, emprega-se coletores solares que forneçam temperaturas entre  $55^{\circ}\text{C}$  e  $95^{\circ}\text{C}$ , dependendo dos valores de certos parâmetros, tais como: temperatura do condensador, temperatura do absorvedor, temperatura do evaporador, e diferença de concentração dos licores. Quanto mais baixas forem as temperaturas do condensador e absorvedor, maior for a temperatura do evaporador e menor for a diferença de concentração entre os licores, necessitar-se-ã temperaturas menores no gerador, e consequentemente temperaturas menores requeridas dos coletores solares.

Para estes ciclos, pode-se utilizar coletores planos tais como do tipo simples e do tipo tubo evacuados.

Os mais comuns são os coletores planos simples, a temperatura de trabalho destes coletores é da ordem de 40 a 60°C, e seu rendimento 30 - 80%. Eles são instalados fixos, orientados no eixo norte-sul, e geralmente, inclinados no ângulo correspondente à latitude local.

A radiação solar incide no absorvedor solar, que é feito de alumínio ou cobre (geralmente), e pintado de negro fosco para absorver melhor a radiação solar, transferindo o calor para a água que é transportada a um tanque de armazenamento. Uma cobertura transparente, de vidro ou material plástico, reduz as perdas de calor por convecção para o ar e um isolante térmico reduz as perdas de calor pelo lado não - exposto a radiação solar.

Para aumentar a faixa de temperatura de trabalho destes coletores, adiciona-se mais uma cobertura transparente e trata-se a superfície do absorvedor, para torná-la seletiva à radiação solar, logrando-se temperaturas de trabalho de 60 a 97°C.

Os coletores planos estacionários, não se pode deixar de mencionar os que, além das duas coberturas e superfície seletiva, têm refletores espelhados, para aumentar a radiação incidente na superfície absorvedora. O fator de concentração destes coletores está em torno de 1,5.

As superfícies denominadas seletivas, são superfí

cies absorvedoras tratadas, geralmente, com negro de cromo, de níquel, óxido de cobre, ou algum outro material. Foram também desenvolvidas tintas seletivas, as quais dão ao absorvedor características de alta absortância no intervalo de pequenos comprimentos de onda, e baixas emitância em comprimentos, de onda maiores. A radiação solar apresenta um pico no espectro de radiação monocromática, para um comprimento de onda de  $0,5 \mu$ . A radiação proveniente de corpos de temperaturas relativamente baixas apresenta comprimentos de onda maiores (infravermelho)

Portanto, as superfícies seletivas para atuar apropriadamente como tais nos absorvedores solares, deverão possuir coeficientes de absorção elevados para radiação de comprimentos de ondas curtos (ultravioleta), e coeficientes de emissão muito pequenos para comprimentos de onda maiores (infra-vermelho).

O segundo grupo de coletores solares estacionários é o composto por tubos evacuados, é efetuado vácuo entre o tubo que conduz o fluido e a superfície transparente envolventes, a superfície absorvedora nestes casos é seletiva. Estes coletores trabalham a temperaturas da ordem de  $60^{\circ}\text{C}$  a  $140^{\circ}\text{C}$ . Algumas das principais empresas que desenvolvem este tubo de coletor são: Philips, Omens-Illinois e General Electric. Os coletores da Philips (ver Figura 39.B1) são simplesmente tubos de vidro evacuados adjacentes, sendo o absorvedor um tubo "U", o qual o fluido entra e sai pelo mesmo extremo. O fator de concentração é 1.

O coletor da Omens-Illinois (Ver a Figura 39.B2) consiste de tubos de vidro evacuados, ligeiramente separados, e o tubo absorvedor é um tubo concêntrico ao tubo transparente. Por baixo há um espelho plano que reflete a radiação à superfície absorvedora o fator de concentração é em torno de 1,2.

O coletor da General Electric (ver Figura 39.B3) - consiste de dois tubos de vidro concêntricos, no meio dos quais há vácuo. O absorvedor é uma chapa metálica que se encontra a direita ao vidro interior, e na qual se acha soldado o tubo em "U", por onde circula o fluido que está sendo aquecido. O fator de concentração deste coletor está em torno de 1,2.

Todos estes coletores devem ser instalados na orientação norte-sul e inclinados conforme a latitude do local. (Ver Figura 39.B4).

#### 4.3.3 - Utilização da energia solar no ciclo de absorção de amônia e água.

Nos ciclos de absorção de amônia e água, deve-se empregar coletores solares que forneçam temperaturas entre  $88^{\circ}\text{C}$  e  $160^{\circ}\text{C}$ , dependendo dos valores de certos parâmetros, tais como: temperatura do condensador, temperatura do absorvedor, temperatura do evaporador, e diferença de concentração dos licores. Quanto mais baixas forem as temperaturas -

do condensador e absorvedor, maior for a temperatura do evaporador e menor for a diferença de concentração entre os - licores, necessitar-se-á temperaturas menores no gerador; conseqüentemente as temperaturas necessárias nos coletores serão menores.

Para estes ciclos, pode-se utilizar os coletores solares estacionários de tubos evacuados, como os descritos anteriormente, e os coletores do tipo vês orientáveis e os do tipo coletores parabólicos compostos.

Os coletores compostos de refletores em vês orientáveis e tubos evacuados (Ver Figura 39.C1), tem o fator de concentração em torno de 3. Experimentalmente, obteve-se temperaturas de trabalho de  $100^{\circ}\text{C}$  a  $180^{\circ}\text{C}$ , com rendimentos em torno de 40% a 34%, respectivamente.

Estes coletores são instalados orientados na direção norte-sul, com uma inclinação conforme a latitude do local, e com as calhas refletoras orientadas na direção - leste-oeste. Os coletores do tipo concentradores parabólicos compostos (CPC), (Ver Figura 39-C2), são feitos de segmentos parabólicos que refletem a radiação solar a uma superfície que varia segundo o ângulo de incidência da radiação solar.

Os segmentos parabólicos são feitos, geralmente, de plástico, ou fibra de vidro, com uma superfície aluminizada. O absorvedor utilizado é o tubo evacuado.

São instalados na orientação norte-sul, com as - calhas situadas na direção leste-oeste. Quando instalados -

fixos no ângulo da latitude do local e com um fator de concentração de 1,5, atingem temperaturas de trabalho que variam de 60°C até 150°C.

Com ajustes sazonais (4 ao ano), e fatores de concentração de 2,5 a 3,5, obtem-se temperaturas de trabalho da ordem de 120°C até 150°C. Com maiores fatores de concentração e ajustes mais frequentes, estes coletores podem atingir temperaturas de 250°C e até maiores. Eles são fabricados comercialmente pela Steelcraft Inc.

Dos concentradores parabólicos compostos, temos um segundo tipo, em que os refletores são também segmentos de parábola. O absorvedor é constituído de um perfil de alumínio pólido anodizado, cuja superfície é tratada com negro cromo para torná-la seletiva. São instalados no ângulo da latitude, com uma calha de fator de concentração igual a 10. São realizados 80 ajustes ao ano. Atingem temperaturas de trabalho em torno de 150°C até 230°C, e rendimento da ordem de 35 a 40%.

Dentre os tipos de coletores compostos, tem-se ainda o CPC evacuado completo (Ver Figura 39.C3). Os refletores são segmentos de parábola construídos de alumínio pólido e anodizado. O absorvedor é de um tubo achatado e tratado seletivamente. Análogamente aos coletores anteriores, sua instalação é no sentido norte-sul, com as calhas refletoras orientadas na direção leste-oeste. Este coletor necessita de correção diária, conforme a direção da incidência solar. 0

fator de concentração é de cerca de 9, atingindo-se temperaturas de trabalho de  $250^{\circ}\text{C}$  a  $315^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.3.4 - Armazenamento da energia.

Considerando-se o caracter intermitente da energia solar, deve-se analisar também o problema de armazenamento ou da própria energia solar para aquecimento do gerador, ou de algum meio de resfriamento no evaporador.

A armazenagem de água quente deverá ser analisada em cada uso específico, segundo as horas de consumo de água quente para o gerador, o perfil de consumo e outros aspectos.

O sistema compõe-se basicamente de coletores solares, trocador de calor no tanque de armazenagem, e bomba de circulação. Esta bomba é orientada por um termostato diferencial, que opera quando a temperatura na saída dos coletores é maior do que a do tanque de armazenagem. Ver Figura 38.

Pode ser utilizado também, uma combinação direta de coletores solares, com o sistema de armazenamento de calor, onde as paredes dos tanques de armazenamento são os próprios coletores solares.

Quanto ao armazenamento de frio no lado do evaporador do ciclo de refrigeração por absorção, poder-se-ia utilizar uma substância de grande capacidade térmica ou uma substância em processo de mudança de fase. Assim, por exemplo,

fabricando-se gelo nos períodos de grande insolação, este poderá ser aproveitado em períodos de baixa insolação ou em períodos noturnos, funcionando de forma intermitente.

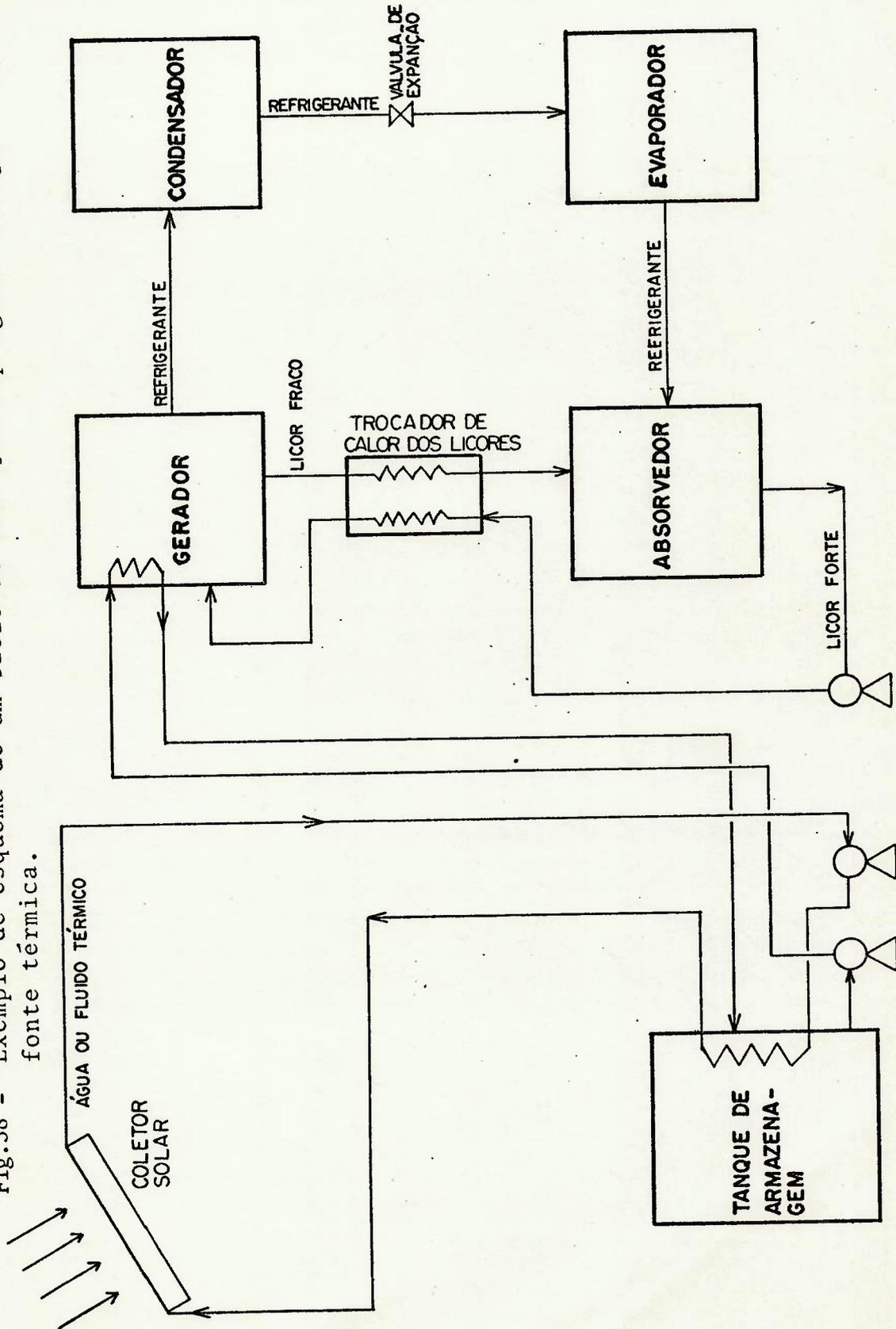
#### 4.4 - Conclusões finais.

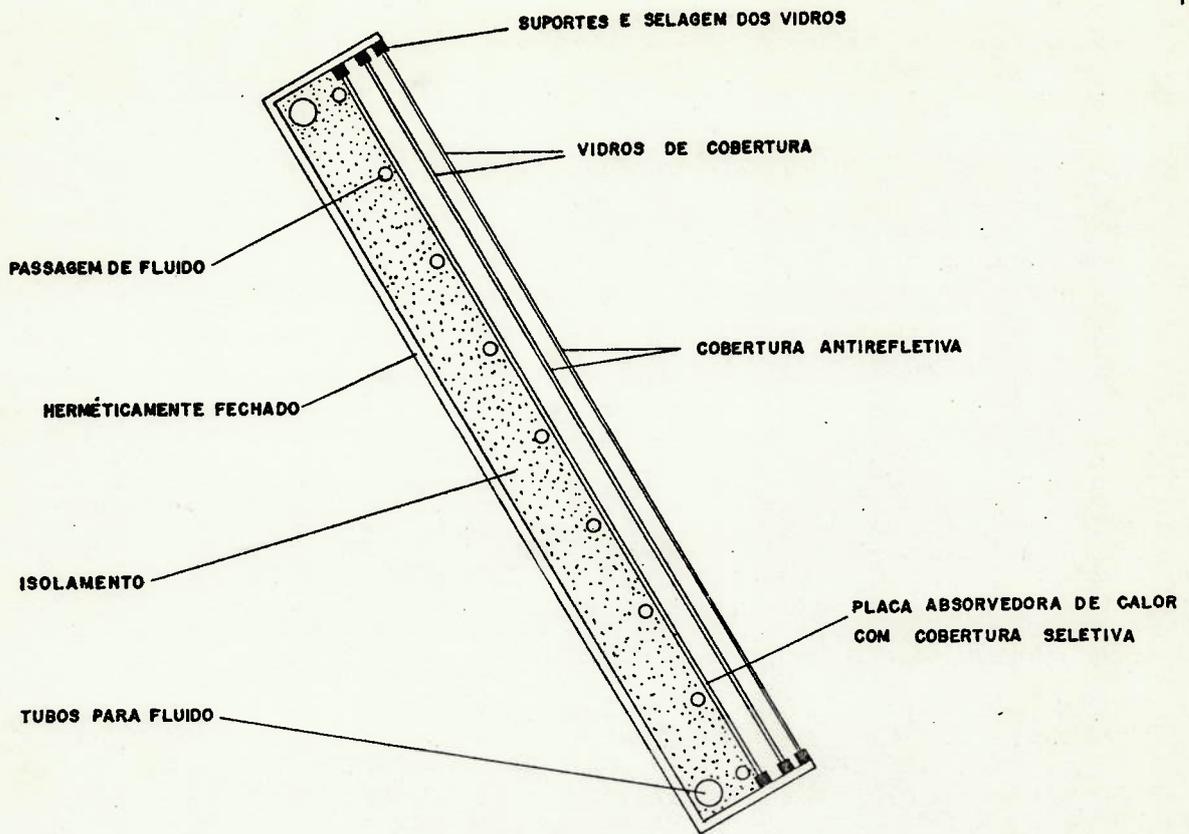
Considerando a análise efetuada neste trabalho, os ciclos de refrigeração por absorção de amônia e água e, de água e brometo de lítio, operando entre os limites das variáveis estabelecidas, apresentam uma grande viabilidade técnica de utilização da radiação solar, como fonte térmica para o gerador. Pode assim, ser empregadas em regiões sem disponibilidade de energia elétrica, pelo menos em carácter intermitente.

Para cada aplicação a ser dada para o ciclo de refrigeração por absorção, deve ser cuidadosamente determinado o par refrigerante-absorvente que será utilizado, devido as restrições que cada um destes pares apresentam, e para a obtenção do melhor desempenho do ciclo.

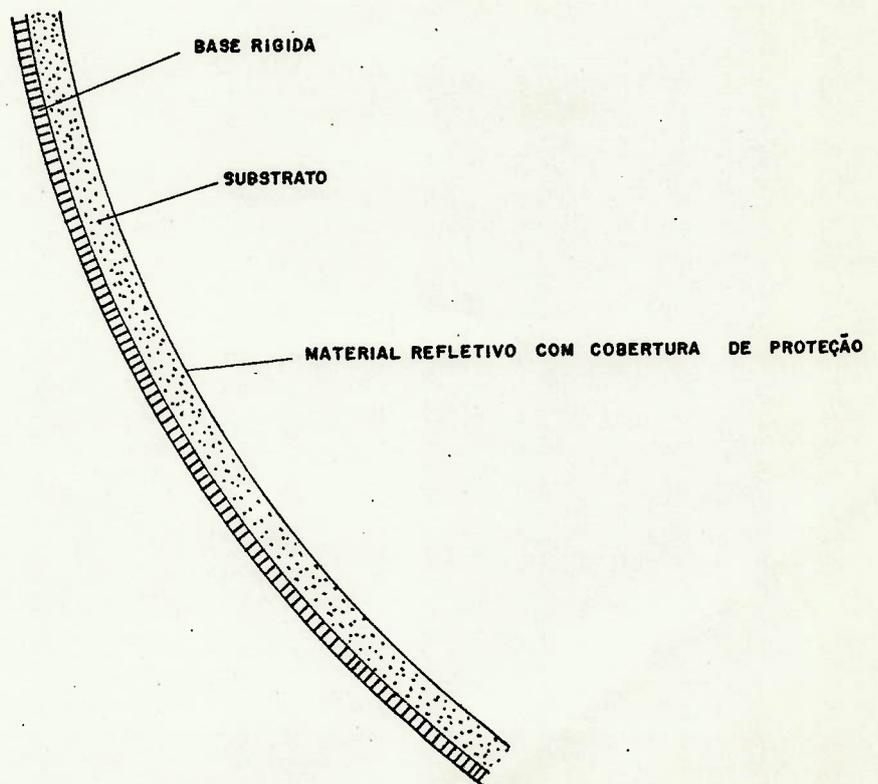
Os ciclos de absorção de amônia e água, empregando energia solar, apresentam um alto investimento inicial necessário, em função do custo dos coletores solares para altas temperaturas. Devido ao crescimento do mercado para estes sistemas, deverá então ser continuado os estudos para redução dos seus custos, para viabilizá-los também do ponto de vista econômico.

Fig.38 - Exemplo de esquema de um ciclo de absorção empregando energia solar como fonte térmica.



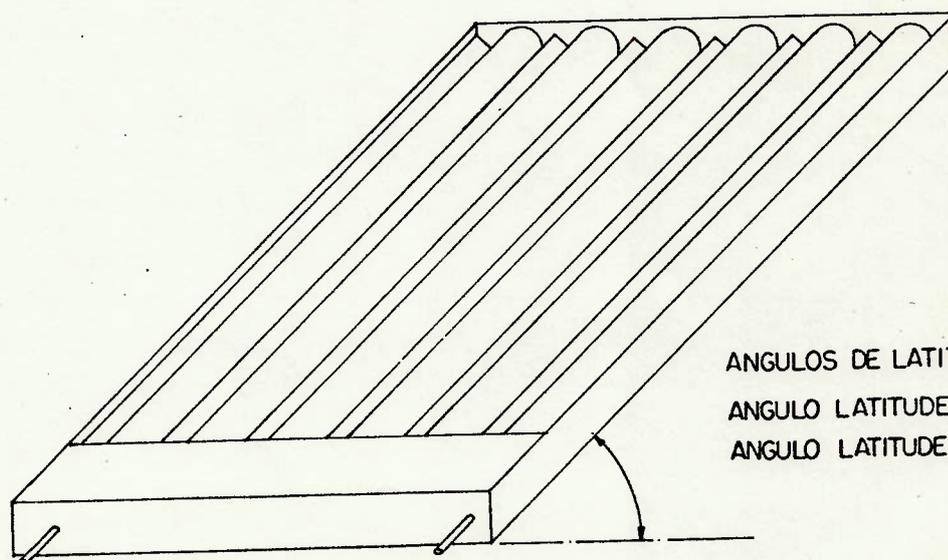
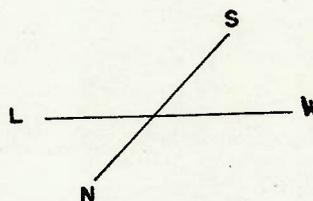
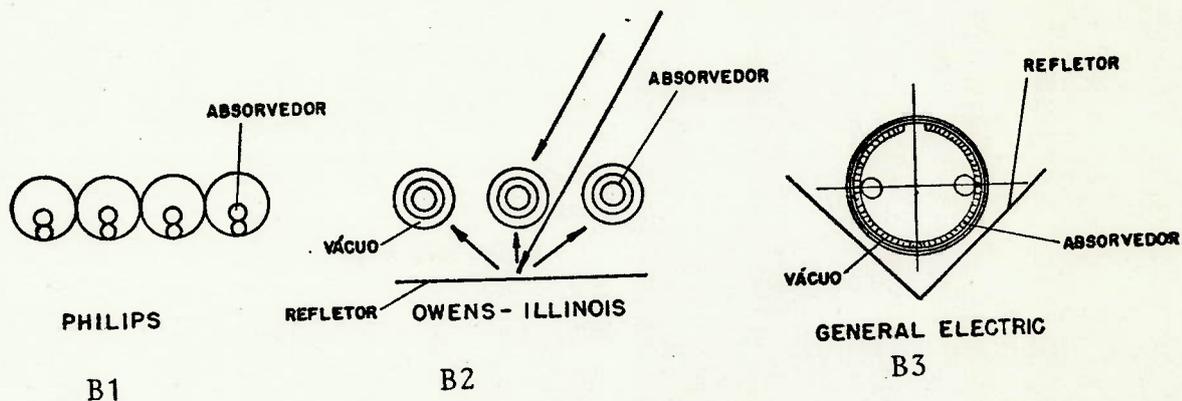


A1 - COLETOR PLANO



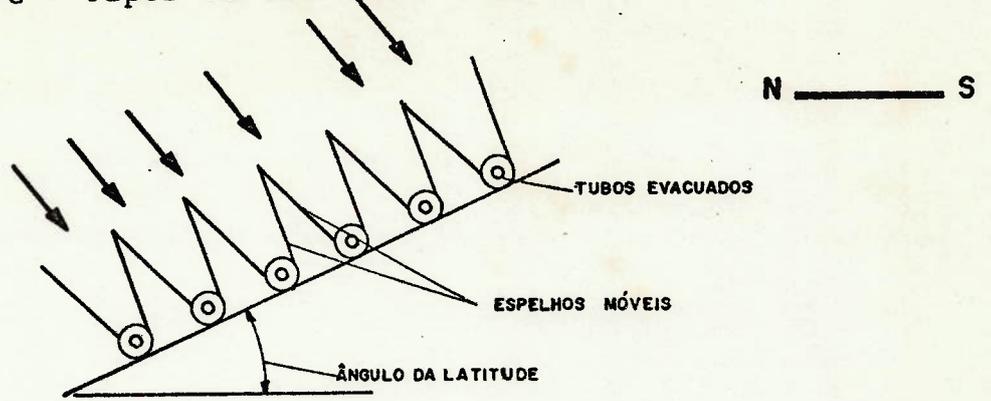
A2 - COLETOR CONCENTRADOR

Fig.39B - Tipos de Coletores Solares

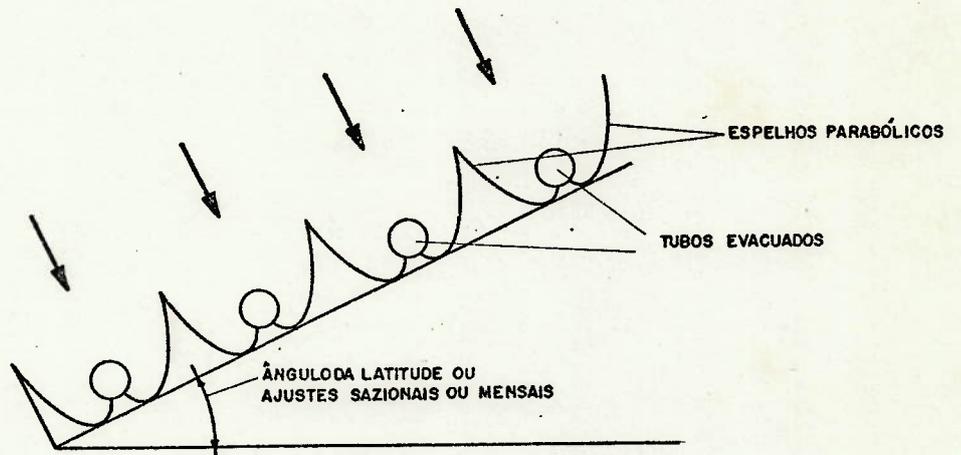


ANGULOS DE LATITUDE OU  
 ANGULO LATITUDE  $-10^{\circ}$  (verão)  
 ANGULO LATITUDE  $+10^{\circ}$  (inverno) [6]

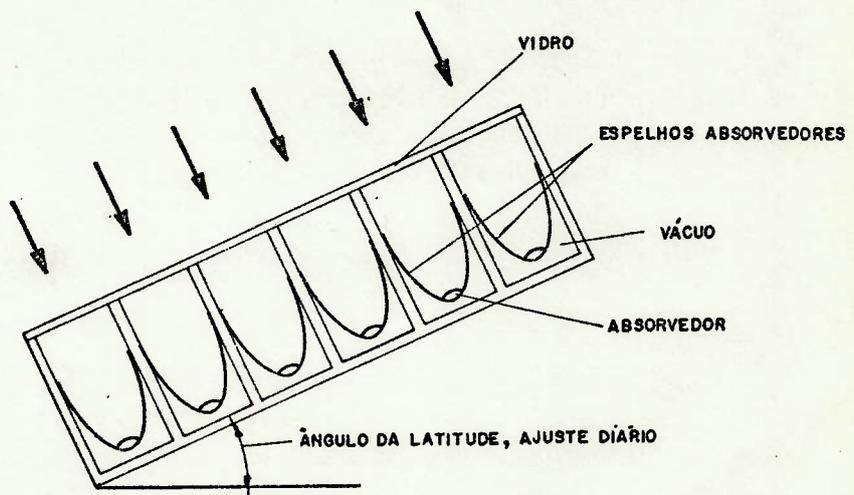
B4 - COLETORES PLANOS TUBULARES EVACUADOS  
 DE VARIOS FABRICANTES



C1- REFLETORES EM VÊS ORIENTÁVEIS



C2- CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPOSTO



C3 - COLETOR COMPOSTO EVACUADO COMPLETO

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - ASHRAE, Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1977.
- [2] - LUDWIG, E.E., Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants, Gulf Publishing Company, Vol.3, 1964.
- [3] - PERRY, J.H., Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill Book Co., Inc., 4ª edition, 1963.
- [4] - ASHRAE, Equipment, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1975.
- [5] - KREIDER, J.F., KREITH, F., Solar Heating and Cooling, Scripta Book Company, 1975.
- [6] - MERRIL, R., GAGE, T., Energy Primer, Solar Water, Wind, and Biofuels, Publishing Co., Inc., 1978.
- [7] - VAN WAYLEN, G.J., SONNTAG, R.E., Fundamentos da Termodinâmica Clássica, Editora Edgard Blücher Ltda, 1976.
- [8] - JONES, W.P., Air Conditioning Engineering, Edward Arnold (Publishers) Limited, 1973.
- [9] - GUNTHER, R.C., Refrigeration Air Conditioning and Cold Storage, Chilton Book Company, 1969.
- [10] - WORKSHOP PROCEEDING, Solar Cooling for Buildings, National Science Foundation Research Applied to National Needs-Rann, Los Angeles, February 6-8, 1974.

- [11] - ASHRAE, Applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1977.
- [12] - LÖF, G.O.G., Design and Constructing of a Residential Solar Heating and Cooling System, National Science Foundation, July, 1974.
- [13] - DODGE, B.F., Chemical Engineering Thermodynamics, McGraw-Hill Book Co., Inc., 1944.
- [14] - PATTON, A.R., Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings, Noyes Data Corporation, 1975.