

## 8 EVAPORADORES

Um evaporador é qualquer superfície de transferência de calor na qual o líquido volátil é vaporizado com o objetivo de remover calor de um espaço ou produto refrigerado. Por causa das muitas e diversas aplicações da refrigeração mecânica, os evaporadores são fabricados em uma grande variedade de tipos, formas, tamanhos e projetos, e podem ser classificados de diferentes modos, tais como tipo de construção, método de alimentação dos líquidos, condição de operação, método de circulação do ar (ou líquido), tipo de controle de refrigerante, e aplicação.

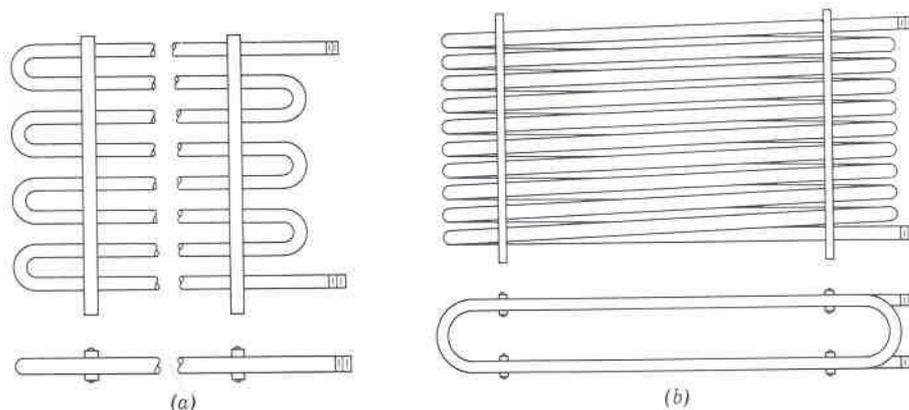
### 8.1 TIPOS CONSTRUTIVOS DOS EVAPORADORES

Os principais tipos de construção dos evaporadores para resfriamento de ar são: de tubo liso, de placa, e de tubos aletados.

#### 8.1.1 Evaporador de tubo liso

Em geral são construídos com tubo de aço, cobre ou alumínio. Tubos de aço são utilizados em evaporadores maiores ou de qualquer tamanho quando se utiliza amônia como refrigerante, em aplicação industrial ou comercial. Tubos de cobre e alumínio são utilizados na fabricação de evaporadores menores uso em unidades residenciais e comerciais que empregam refrigerantes diferentes de amônia (fig. 75).

FIGURA 75 - SERPENTINAS DE TUBO LISO - a) plana ou zigue-zague b) trombone oval



#### 8.1.2 Evaporador de placa

Existem várias formas de construção. Um dos tipos mais comuns é feito com duas placas soldadas de forma que entre elas fiquem sulcos por onde passa o fluido refrigerante. Este tipo é muito usado em refrigeradores domésticos. Outro

tipo comum é feito com duas placas planas e paralelas justapostas a tubos simples. O espaço vazio entre as placas ou é evacuado ou cheio de uma solução eutética com objetivo de promover um bom contato térmico.

Normalmente, nas câmaras, são usados grupos de placas (bancos) montados horizontalmente ou verticalmente, no teto ou nas paredes da câmara (fig. 76).

FIGURA 76 - EVAPORADOR DE PLACA



### 8.1.3 Evaporador de tubos aletados

São evaporadores de tubos que atravessam placas perfuradas e paralelas (aletas). As aletas devem ficar ligadas rigidamente aos tubos, pois operam como superfícies secundárias e devem transmitir o calor para os tubos e refrigerante. O uso das aletas aumenta a área de troca térmica permitindo usar evaporadores de menores dimensões. O tamanho das aletas e o espaçamento entre elas dependem sobremaneira da aplicação do evaporador. O tamanho dos tubos define o tamanho das aletas. A temperatura de operação define o espaçamento entre as aletas. O espaçamento pode variar de 1 a 14 aletas por polegada. Para baixas temperaturas devem-se usar poucas aletas por polegada (3 a 4) para evitar o congelamento entre elas, (fig. 77).

FIGURA 77 - EVAPORADOR DE TUBOS ALETADOS (EXPANSÃO DIRETA)

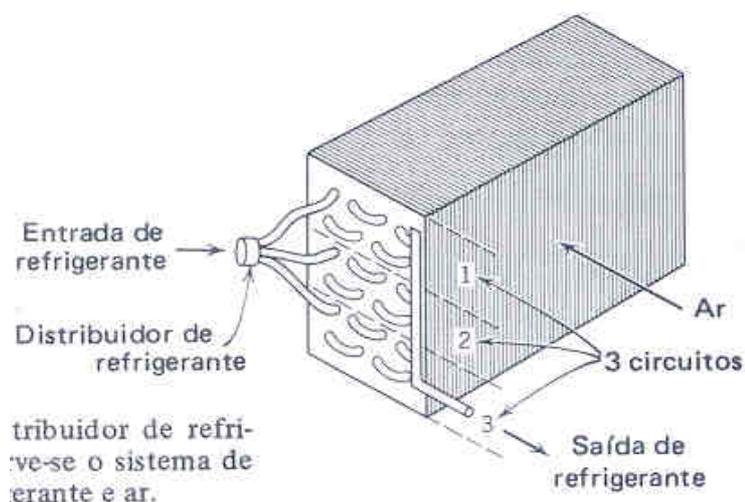


## 8.2 CIRCUITO DO EVAPORADOR

A queda de pressão excessiva no evaporador resulta no vapor de sucção que chega à admissão do compressor a uma pressão mais baixa do que é realmente necessário, causando com isso, uma perda na capacidade e eficiência do compressor.

Para evitar perdas desnecessárias na capacidade e eficiência do compressor, é interessante projetar o evaporador de tal modo que o refrigerante sofra uma queda mínima na pressão. Por outro lado, é requerida uma certa quantidade de queda de pressão para fluir o refrigerante através do evaporador e, dado que a velocidade é uma função da queda de pressão, a queda de pressão deve ser suficiente para assegurar velocidades do refrigerante, suficientes para tornar as superfícies do tubo livres de bolhas de vapor e óleo e para levar o óleo para o compressor. Por isso, bons projetos requerem que o método de circuito do evaporador seja tal, que a queda de pressão através deste seja o mínimo necessário para produzir velocidades do refrigerante suficientes para assegurar uma taxa alta de transmissão de calor e bom retorno de óleo. Na (fig. 78) mostra-se uma circuitação do evaporador com distribuidor de refrigerante que é muito eficiente e bastante usado, principalmente quando a carga do circuito é pesada, como no caso de uma serpentina de condicionamento de ar, onde o diferencial de temperatura entre o refrigerante e o ar é grande e onde a aleta externa é pesada. Observa-se que o ar que passa em contrafluxo para o refrigerante, de modo que o ar mais quente fica em contato com a parte mais quente da superfície da serpentina. Isto garante a diferença média de temperatura maior, e a taxa mais elevada de transmissão de calor. Observa-se também que a carga dos circuitos é igual. O número e comprimento dos circuitos que tal serpentina poderia ter são determinados pelo tamanho do tubo e pela carga sobre os circuitos.

FIGURA 78 - CIRCUITAÇÃO DO EVAPORADOR COM DISTRIBUIDOR DE REFRIGERANTE



### 8.3 MÉTODOS DE ALIMENTAÇÃO DO EVAPORADOR

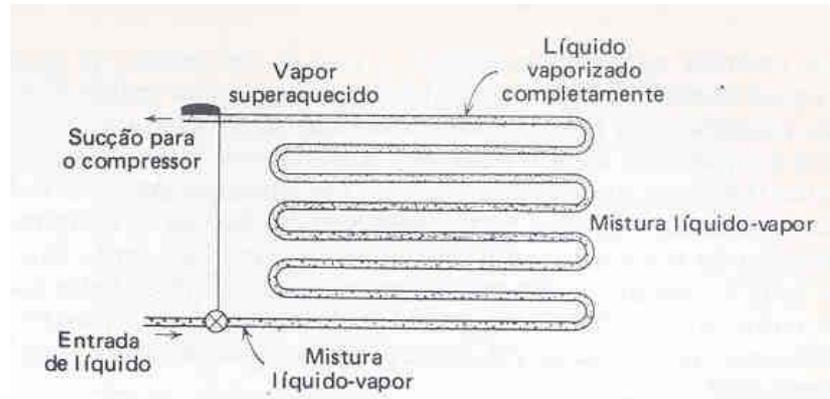
Os evaporadores podem ser classificados de acordo com o método de alimentação do líquido, como expansão seca, inundado ou de sobre-alimentação líquida.

No evaporador de expansão seca (fig. 79a) o fluido refrigerante inicia sua vaporização já na válvula de expansão. Na saída do evaporador todo refrigerante deve se encontrar na forma de vapor. A taxa de vaporização no interior do evaporador é uma função da carga térmica exigida.

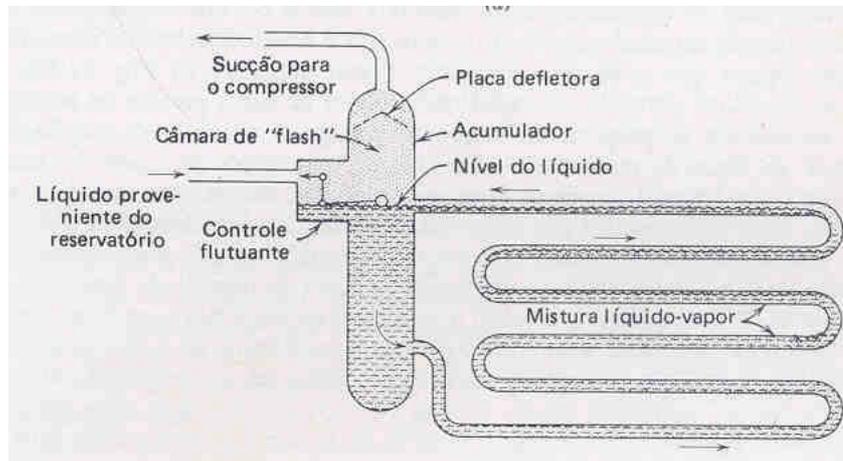
O evaporador inundado (fig. 79b) é aquele que trabalha repleto de líquido refrigerante. O nível de refrigerante dentro do evaporador é mantido por uma válvula de bóia. O vapor formado no evaporador é succionado pela ação do compressor, como vantagens, o evaporador inundado apresenta maior coeficiente de transmissão de calor, melhor comportamento em relação à variação na carga térmica, fornece vapor saturado seco ao compressor e não vapor superaquecido e como desvantagens, o evaporador inundado é caro, necessita de um separador de líquido, é utilizado para grandes instalações, apresenta elevado volume e grande quantidade de refrigerante se faz necessário.

Um evaporador de sobre-alimentação líquida é aquele em que a quantidade de refrigerante líquido circulada através do evaporador é consideravelmente excessiva em relação àquela que pode ser vaporizada. O excesso de líquido é separado do vapor por um coletor de baixa pressão ou acumulador, e recirculado ao evaporador, enquanto o vapor é extraído da sucção do compressor. Os evaporadores de sobre-alimentação (recirculação de líquido) são mais comuns e mais economicamente empregados em sistemas de evaporadores múltiplos (fig. 80).

FIGURA 79 - a) EVAPORADOR DE EXPANSÃO SECA,  
b) EVAPORADOR INUNDADO

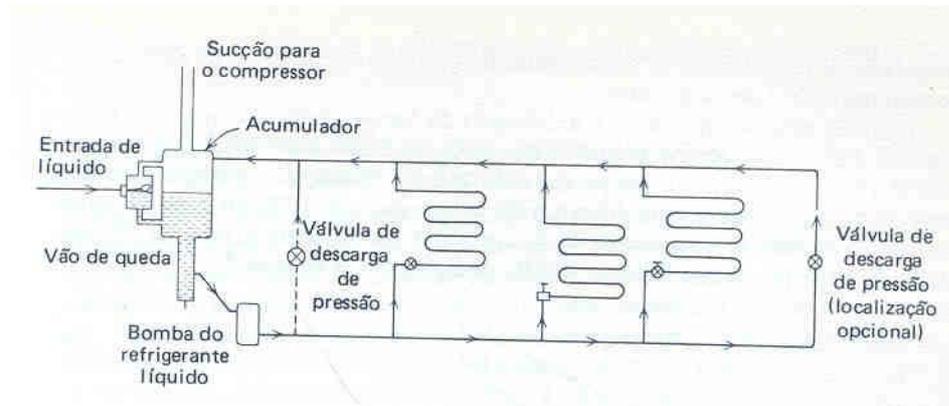


(a)



(b)

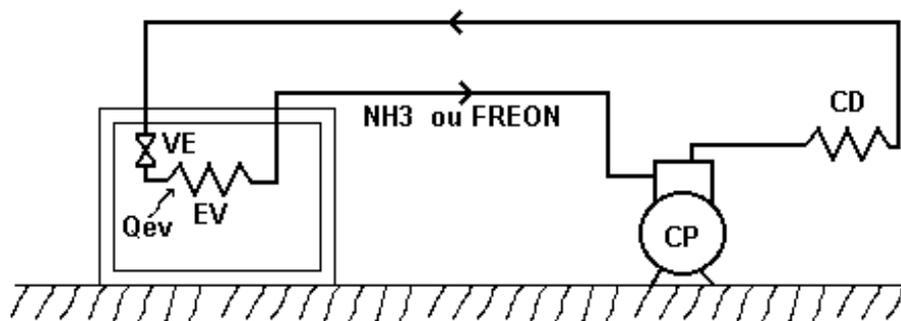
FIGURA 80 - EVAPORADORES MÚLTIPLOS



#### 8.4 SISTEMAS DE EXPANSÃO DIRETA E INDIRETA

Um sistema de refrigeração de expansão direta é aquele em que o evaporador do sistema, empregando um refrigerante de expansão direta, está em contato direto com o espaço ou material que está sendo refrigerado, como ilustra a (fig. 81).

FIGURA 81 - SISTEMA DE EXPANSÃO DIRETA



Muitas vezes, é inconveniente ou antieconômico circular um refrigerante de expansão direta para a área ou áreas onde é requerida a refrigeração. Em tais casos, é empregado um sistema de refrigeração de expansão indireta (fig. 82) que é aquele em que aparece um agente intermediário, como, por exemplo, água ou salmoura entre o meio a ser resfriado e o refrigerante. Água ou salmoura é resfriada por um refrigerante de expansão direta num resfriador de líquido e então bombeada através de tubulação apropriada para o espaço ou produto que está sendo refrigerado. O agente intermediário, aquecido pela absorção de calor do espaço refrigerado ou do produto, retorna ao resfriador para ser resfriado e recirculado.

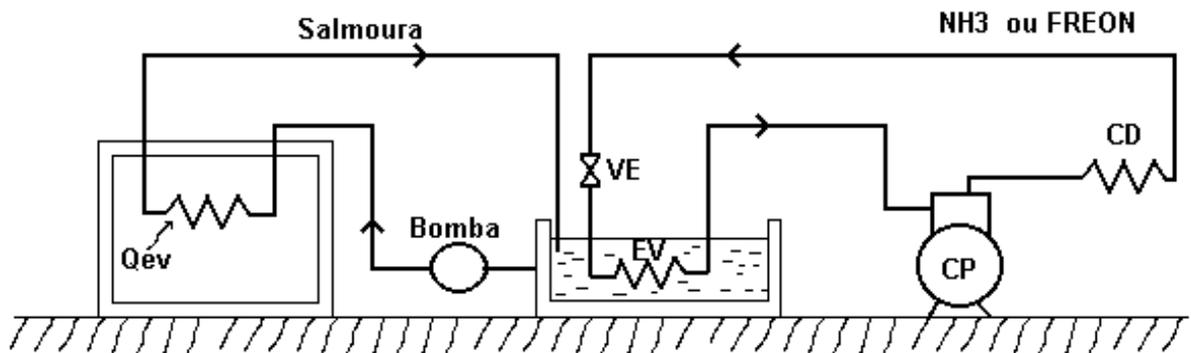
Vantagens da expansão indireta:

- é mais fácil distribuir água ou salmoura do que amônia ou halogenados.
- não circula fluido refrigerante dentro do meio a resfriar.
- a parte frigorífica fica concentrada.
- a flutuação da carga é mais bem atendida (Indicada quando se necessita de muito frio durante pouco tempo).

Desvantagens da expansão indireta:

- a temperatura de evaporação é menor no caso de expansão indireta, portanto, é menor o coeficiente de eficácia; tamanho do compressor maior; motor necessário é maior;
- preço maior;
- mais complexo.

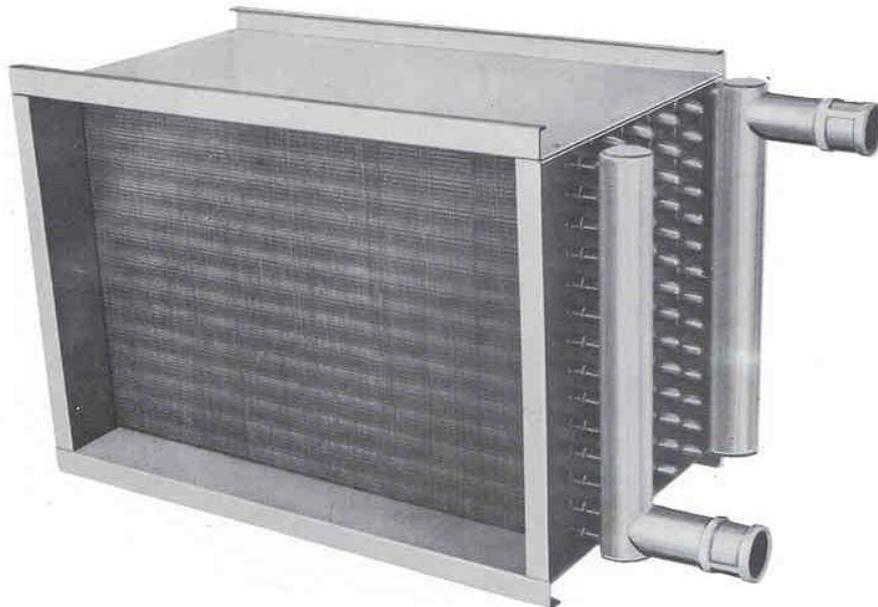
FIGURA 82 - SISTEMA DE EXPANSÃO INDIRETA



Os resfriadores para o caso de expansão indireta podem ser classificados como, resfriadores de ar, resfriadores de líquido e resfriadores de sólido.

A (fig. 83) ilustra uma serpentina de água gelada utilizada em fan&coils para resfriamento do ar.

FIGURA 83 - SERPENTINA DE ÁGUA GELADA



### 8.5 EVAPORADORES DE CONVECÇÃO NATURAL E FORÇADA

Utilizam-se os evaporadores de convecção natural, quando são desejáveis baixas velocidades de ar e mínima desidratação do produto. Ex. refrigeradores domésticos, expositores e grandes câmaras de armazenagem.

Os evaporadores de convecção forçada são utilizados quando não há problema de desidratação do produto, tendo como vantagens: um evaporador mais compacto, maior coeficiente de transmissão de calor, melhor uniformidade da temperatura interna da câmara e maior rapidez no resfriamento do ar e como desvantagens: aumento da carga térmica devida aos motores que acionam os ventiladores, provoca a desidratação dos produtos e a construção compacta dificulta manutenção.

### 8.6 MÉTODOS DE DEGELO

Existem muitos tipos de controle que podem ser utilizados. Em algumas aplicações não é necessário que exista períodos programados de degelo. O fato de o compressor desligar quando a temperatura da câmara é atingida já poderá propiciar o degelo (isso em casos em que a câmara trabalha com temperaturas superiores a 0°C). Em outras aplicações um temporizador de degelo poderá ser necessário para que se mantenha a serpentina isenta de gelo. Em câmaras de média temperatura, o degelo por ar é controlado pelo temporizador, mas o(s) ventilador(es) do evaporador continuam operando de maneira a facilitar o degelo. Outros sistemas de degelo necessitam uma parada dos ventiladores durante o período de degelo (para evitar que os mesmos “joguem” o calor do degelo dentro da câmara). Para a maior parte das aplicações dois a quatro ciclos de degelo por dia são suficientes. As necessidades de degelo variarão de instalação para

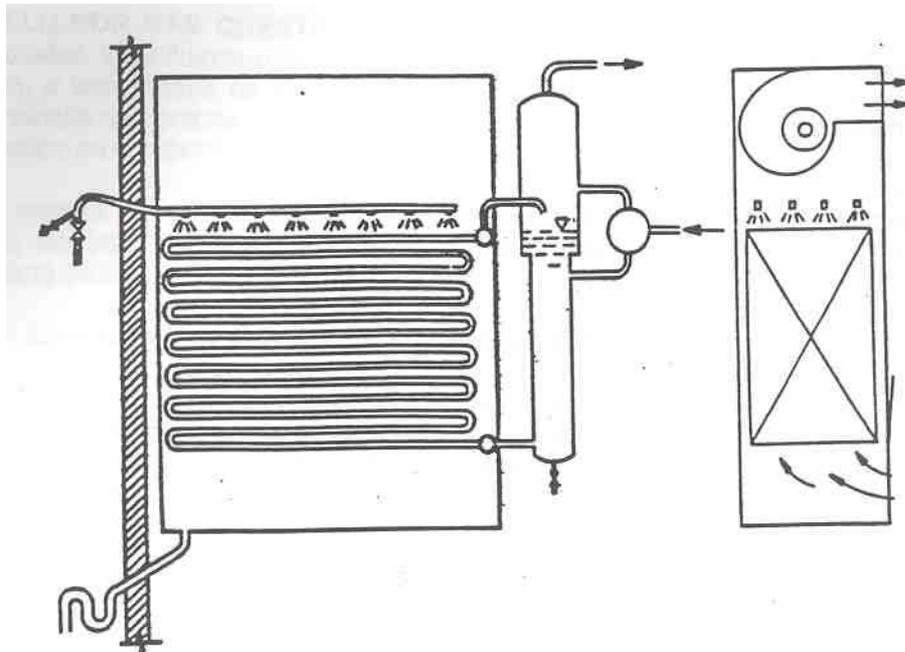
instalação. Por isso as regulagens de degelo deverão ser determinadas observando-se o sistema em funcionamento.

Os métodos mais comuns de degelo da serpentina de refrigeração são:

**DEGELO A AR:** Assume distintas formas. Em espaços refrigerados que operem a temperaturas superiores a 2°C é possível utilizar o próprio ar ambiente para degelar a serpentina, desde que a circulação de refrigerante seja cortada. O processo é lento, de modo que o projetista deve se assegurar que as serpentinas que permanecem em operação durante o degelo, satisfaçam a carga de refrigeração.

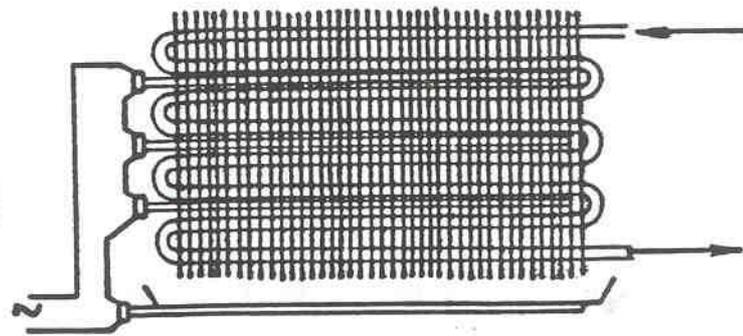
**DEGELO A ÁGUA:** Consiste em espargir água sobre a serpentina, drenando a água fria resultante para fora do espaço refrigerado, (fig. 84).

FIGURA 84 - DEGELO A ÁGUA



**DEGELO ELÉTRICO:** É obtido através de um aquecedor elétrico montado de forma a manter um bom contato térmico com a serpentina. Uma solução frequentemente utilizada é a inserção de uma resistência tubular durante a montagem da serpentina, constituindo um tubo não ativo. O custo inicial do degelo elétrico é, provavelmente, o menor entre todas as opções propostas anteriormente. No entanto, o seu custo operacional pode ser elevado em virtude das tarifas de energia elétrica em vigor, (fig. 85).

FIGURA 85 - DEGELO ELÉTRICO

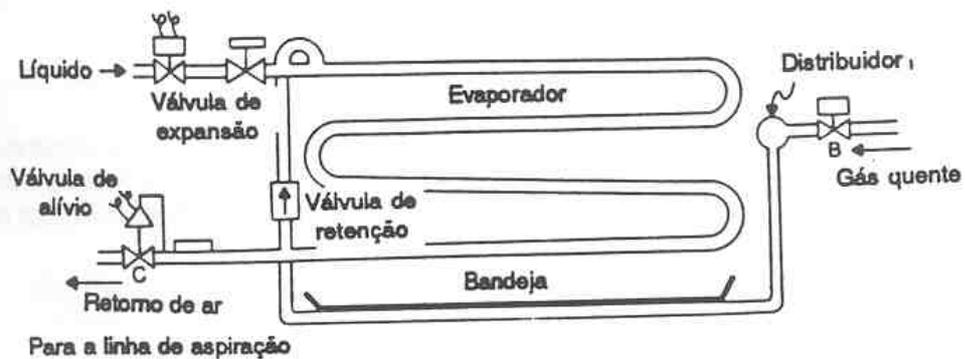


Elementos embutidos no  
resfriador e bacia.

**DEGELO POR GÁS QUENTE:** Consiste em interromper o suprimento de refrigerante líquido ao evaporador, substituindo-o pelo de vapor do refrigerante a alta pressão. Para garantir um rápido degelo, a temperatura de saturação é mantida em níveis suficientemente elevados pela ação de uma válvula de controle de pressão instalada na saída do evaporador. Assim durante o degelo, a serpentina se comporta como um condensador, (fig. 86).

Uma maneira de controlar a formação de neve sobre as superfícies das serpentinas que operam a baixas temperaturas é borrifá-las com algum anti-congelante (salmoura), como etileno glicol ou propileno glicol.

FIGURA 86 - DEGELO POR GÁS QUENTE



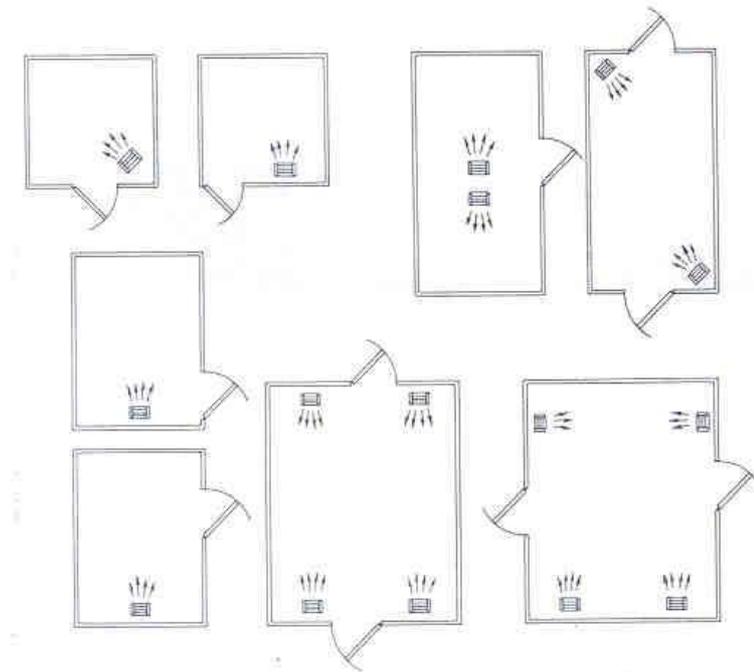
## 8.7 LOCALIZAÇÃO DO EVAPORADOR E DISTRIBUIÇÃO DO AR

A localização do evaporador na câmara pode ser fundamental para o sucesso de sua operação.

Recomendações básicas para a localização do evaporador, (fig. 87):

- A distribuição do ar deve cobrir toda a câmara;
- Evitar instalação sobre as portas;
- Localizar as unidades para o mínimo comprimento das linhas de refrigerante;
- Deve-se conhecer na câmara a posição dos corredores, prateleiras, etc.
- Localização das linhas de dreno para o mínimo comprimento;
- Deixar espaço suficiente entre o fundo do evaporador e a parede, não menos que 45 cm.

FIGURA 87 - LOCALIZAÇÃO DO EVAPORADOR



## 8.8 CAPACIDADE DO EVAPORADOR

É a quantidade de calor que ele deve absorver do espaço refrigerado, num certo intervalo de tempo.

O calor chega ao evaporador por três métodos distintos: convecção do ar; radiação direta do produto; condução direta (quando o produto está em contato com o evaporador). Já, o calor que passa através do evaporador com destino ao refrigerante, o faz por condução. Este calor pode ser obtido por:

$$\dot{Q}_e = U \times A \times \text{LMTD} \quad (57)$$

onde,

- $\dot{Q}_e$  capacidade do evaporador, kJ/h  
 $U$  coeficiente global de transferência de calor, kJ/hm<sup>2</sup>°C  
 $A$  área de superfície do evaporador (tubos e aletas), m<sup>2</sup>  
 LMTD diferença de temperatura média logarítmica entre o refrigerante dentro do evaporador e o meio externo, °C

A diferença de temperatura média logarítmica, LMTD é dada por:

$$LMTD = \frac{(t_e - t_r) - (t_s - t_r)}{\ln \frac{(t_e - t_r)}{(t_s - t_r)}} \quad (58)$$

onde,

- $t_e$  temperatura do ar que entra na serpentina, °C  
 $t_s$  temperatura do ar que deixa a serpentina, °C  
 $t_r$  temperatura do refrigerante nos tubos, °C

O coeficiente global de transmissão de calor em um evaporador resfriado a ar com o refrigerante circulando dentro dos tubos pode ser calculado por:

$$U_o = \frac{1}{(A_o/A_i)/h_w + (t/k)(A_o/A_m) + 1/(h_r\phi_w)} \quad (59)$$

onde,

- $U_o$  coeficiente global de transferência de calor baseado na superfície externa e a LMTD, kJ/hm<sup>2</sup>°C  
 $A_o/A_i$  relação entre a área da superfície externa e interna do tubo  
 $h_w$  coeficiente de filme interno lado do refrigerante, W/m<sup>2</sup>°C  
 $t$  espessura da parede do tubo, m  
 $k$  condutibilidade térmica do material do tubo, W/m°C  
 $A_o/A_m$  relação de área entre a superfície externa e a superfície circunferencial média da parede de metal do tubo  
 $h_r$  coeficiente de filme externo lado do ar, W/m<sup>2</sup>°C  
 $\phi_w$  eficiência da aleta (100% para tubos não aletados)

## 8.9 SELEÇÃO DO EVAPORADOR

O projeto de serpentinas de refrigeração é complexo, incluindo tópicos como circuitagem, disposição dos tubos, projetos das aletas, entre outros, para conseguir uma taxa de transferência de calor máxima para um dado custo inicial. Assim o presente capítulo visa tão somente o selecionamento de serpentinas através de catálogos de fabricantes para aplicação em instalações, através do procedimento a seguir:

- calcular a carga térmica sem considerar os motores que acionam os ventiladores do evaporador (caso seja convecção forçada);
- escolher a diferença de temperatura do evaporador,  $\Delta T$ (tab. 2);

onde

$\Delta T$  diferença de temperatura entre a temperatura do ar que entra no evaporador (tomado como sendo a temperatura interna da câmara) e a temperatura de evaporação do fluido frigorífico.

Como exemplo um evaporador com um  $\Delta T$  de  $6^{\circ}\text{C}$ , quer dizer que com uma temperatura na câmara de  $7^{\circ}\text{C}$ , a temperatura de evaporação do refrigerante é de  $1^{\circ}\text{C}$ .

O evaporador deve operar a uma temperatura inferior à da câmara e a diferença entre estas duas temperaturas permite controlar a umidade dentro da câmara.

O controle da umidade em ambientes refrigerados é muito importante. Em alguns casos, como no armazenamento de verduras frescas, a umidade do ambiente deve ser mantida elevada para preservar a qualidade do produto. Em outros, como no caso de câmaras de resfriamento de carnes, a umidade deve ser mantida baixa a fim de evitar a formação de névoa e o gotejamento de água sobre o produto.

TABELA 2 - DIFERENÇA DE TEMPERATURA,  $\Delta T$

SISTEMA	$\Delta T$
Unidade Evaporadora - alta temperatura	3 a 12 C
Unidade evaporadora - baixa temperatura	4 a 8 C
Condensador remoto para refrigeração	5 a 8 C
Ar condicionado	10 a 17 C

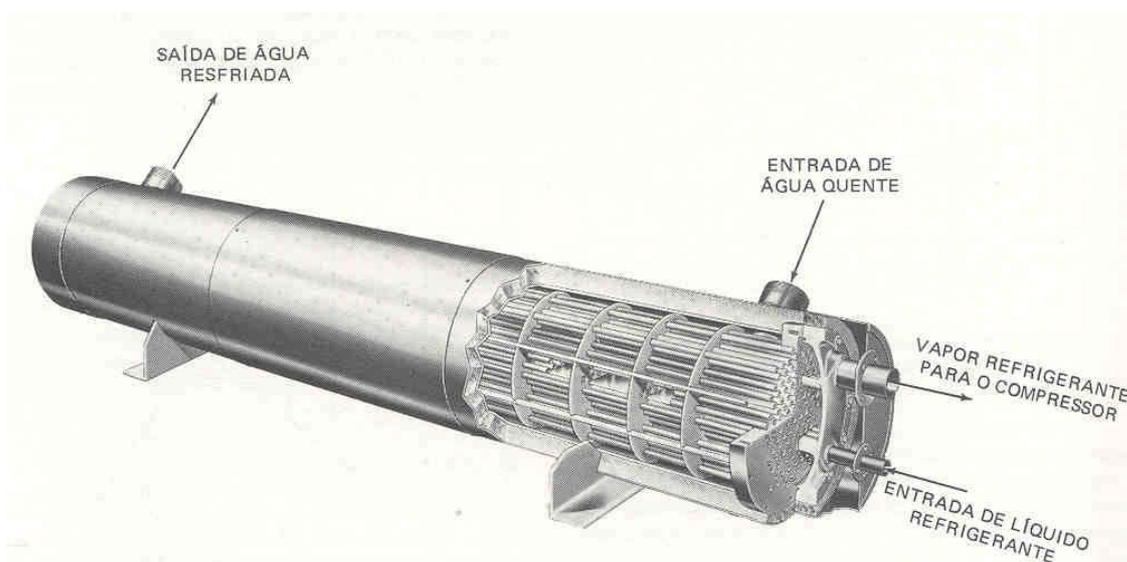
Os fabricantes trabalham com  $\Delta T$  da ordem de  $6^{\circ}\text{C}$  a  $8^{\circ}\text{C}$ .

- Dependendo do fabricante verificar se o  $\Delta T$  é igual ou maior que o utilizado pelo fabricante, com o qual foram definidos as capacidades dos evaporadores.
- Escolher o evaporador em função da capacidade em [kW] e da temperatura de evaporação.
- Recalcular a carga térmica considerando os motores dos ventiladores.
- Verificar se a nova carga térmica não ultrapassa a capacidade do evaporador ou evaporadores. Caso ultrapasse, escolha o(ou) evaporador(es).

## 8.10 RESFRIADORES DE LÍQUIDO

Como os evaporadores de resfriamento de ar, os evaporadores que resfriam líquidos, chamados de resfriadores de líquido, variam em tipo e projeto, de acordo com o tipo de trabalho a que são destinados, como, por exemplo, o resfriador de líquido do tipo carcaça-tubos (shell and tube), ilustrado na (fig. 68), onde o refrigerante muda de fase escoando pelo interior dos tubos.

FIGURA 88 - RESFRIADOR DE LÍQUIDO SHELL AND TUBE

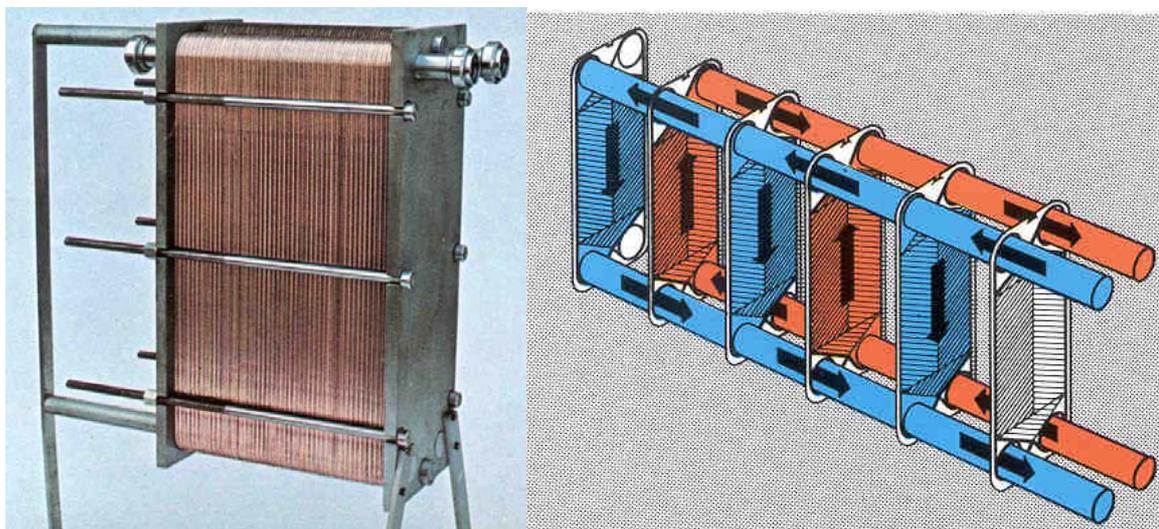


### 8.11 TROCADOR DE PLACAS

O trocador de placas de gaxeta (fig. 69), consiste de um conjunto de placas corrugadas com aberturas para passagem de dois fluidos entre os quais ocorrerá a transferência de calor. O conjunto de placas é montado entre as placas de estrutura e pressão e apertado por parafusos. As placas contêm gaxetas que as fixam selando os canais e direcionam os fluidos em canais alternados.

Graças ao projeto, pode ser facilmente desmontado para inspeção e limpeza. Além disso, pode ser ampliado, modificado segundo um novo arranjo com facilidade a fim de atender a um aumento ou alteração de serviços.

FIGURA 89 - TROCADOR DE PLACAS DE GAXETA



O trocador de calor a placas é usado para aquecimentos, resfriamentos e recuperação de calor em muitas áreas tais como, processamento químico, produção de polpa e papel, processamento de leite e alimentos, HVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado), engenharia mecânica, geração de energia, produção de aço e metais, plataformas de produção de gás e óleo; processamento de gás e óleo, a bordo de navios.

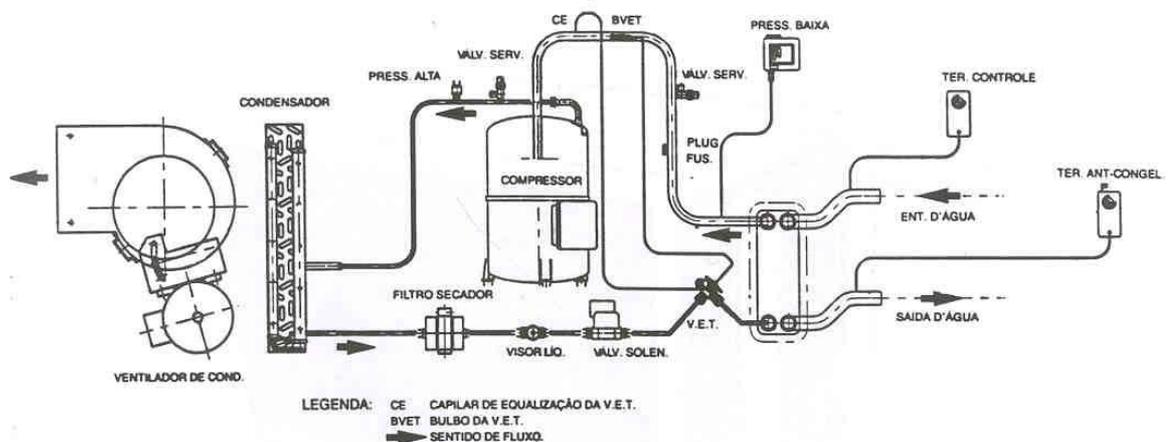
Da mesma maneira que o trocador de calor a placas de gaxeta, o trocador de calor a placas soldado (fig. 90) é construído de uma série de placas de metal corrugadas, mas sem gaxetas, parafuso de aperto, estrutura e barras transportadoras. O trocador de calor a placas soldado consiste simplesmente de placas de aço inoxidável e duas placas finais.

As placas são brazadas juntas em um forno a vácuo, para formar uma unidade compacta resistente à pressão.

Os dois fluidos correm em canais separados. A construção faz-se ideal para condições de operação com alta temperatura e alta pressão.

A turbulência criada pelo desenho das placas promove transferência de calor, mas retarda incrustação. Este tipo compacto pode ser facilmente montado diretamente na tubulação sem braçadeiras ou furações.

FIGURA 90 - CIRCUITO FRIGORÍFICO DE UM RESFRIADOR DE LÍQUIDO COM TROCADOR DE PLACAS SOLDADO



## 8.12 EXEMPLO ILUSTRATIVO

**EXEMPLO 8.12.1:** Qual deve ser o valor do coeficiente global de transferência de calor,  $U$ , em um evaporador em que o coeficiente de transferência de calor no lado do ar é igual a  $60 \text{ W/m}^2$  e o coeficiente correspondente no lado do refrigerante é igual a  $1200 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . O tubo apresenta diâmetro interior e exterior de  $20,9 \text{ mm}$  e  $26,7 \text{ mm}$ , respectivamente. O material do tubo é aço, cuja condutividade térmica é de  $45 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .