

EVAPORADORES

Profa. Alessandra Lopes de Oliveira
FZEA/USP

Definição

- Qualquer superfície de transmissão de calor na qual o líquido refrigerante é vaporizado visando remover calor do ambiente ou produto;
- **Trocador de calor:** retira calor provocando evaporação de um fluido refrigerante (lado de baixa pressão).

Classificação

- **Tipo de construção;**
- **Método de alimentação dos líquidos;**
- Condição de operação;
- Tipo de controle de refrigerante;
- Aplicação;
- **Métodos de circulação de ar.**

Tipo de construção

- Evaporador de tubo liso;
- Evaporador de placas;
- Evaporador de tubo com aletas;

Tipo de Construção

- Evaporador de tubo liso e de placas:
 - Evaporadores de superfície primária \Rightarrow tubos e placas em contato com o refrigerante vaporizando;
- Evaporador com aletas:
 - Serpentina de tubo liso transportam o refrigerante \Rightarrow superfície primária;
 - Aletas não transportam o refrigerante \Rightarrow superfície de transmissão de calor secundária.

Evaporadores de tubo liso

- Construção:
 - Tubulação de aço ou cobre
 - Aço: grandes tubulações e amônia;
 - Cobre: outros refrigerantes.
- Formas:
 - Serpentina plana em ziguezague;
 - Serpentina em espiral para resfriamento de líquidos.

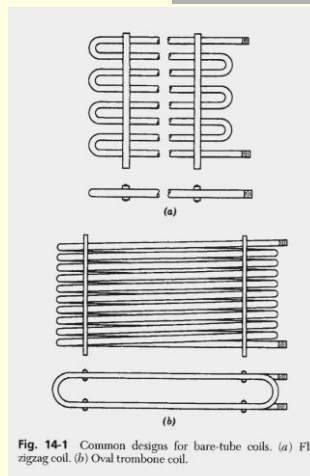


Fig. 14-1 Common designs for bare-tube coils. (a) Flat zigzag coil. (b) Oval trombone coil.

Evaporadores de tubo liso

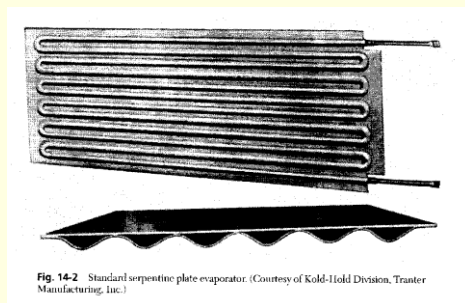
■ Utilização:

- Câmaras de armazenagem frigorífica onde é necessária a circulação de grande quantidade de ar a baixa velocidade.

Evaporadores de placa

■ Construção:

- Duas placas de metal (lisa e corrugada) soldadas;
- O relevo da placa corrugada permite o escoamento do refrigerante entre as placas;



Evaporadores de placa

■ Construção:

- Tubulação soldada entre duas placas.

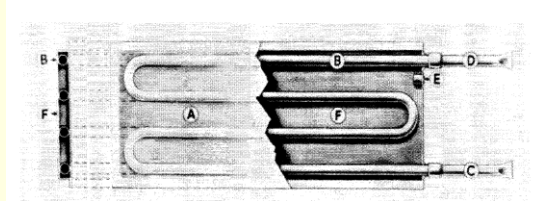


Fig. 14-4 Plate-type evaporator. (Courtesy of Dole Refrigerating Company.) (A) Outside jacket of plate. Heavy, electrically welded steel. Smooth surface. (B) Continuous steel tubing through which refrigerant passes. (C) Inlet from compressor. (D) Outlet to compressor. Copper connections for all refrigerants except ammonia where steel connections are used. (E) Fitting where vacuum is drawn and then permanently sealed. (F) Vacuum space in dry plate. Space in holdover plate contains eutectic solution under vacuum. No maintenance required due to sturdy, simple construction. No moving parts; nothing to wear or get out of order; no service necessary.

Evaporadores de placa

■ Utilização:

- Por serem de fácil limpeza, de fabricação econômica e fáceis de moldar, são utilizados em:
 - Refrigeradores de uso doméstico;
 - Tetos e paredes de caminhões refrigerados;
 - Prateleiras em câmara fria;
 - Balcões expositores de alimentos congelados e resfriados;
 - Câmaras de sorvetes.

Evaporadores de placa

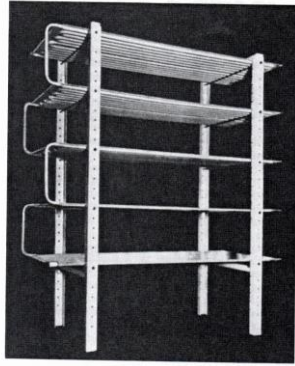


Fig. 14-7 Plate evaporators employed as freezer shelves. Note that plates are arranged for series refrigerant flow. (Courtesy of Kold-Hold Division, Transer Manufacturing, Inc.)

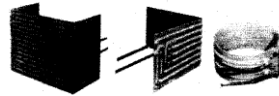
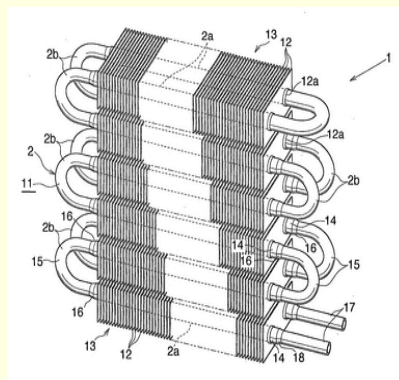


Fig. 14-3 Some typical shapes available in plate-type evaporators. (Courtesy of Dean Products, Inc.)

Evaporadores com aletas

■ Construção:

- Serpentina de tubos lisos sobre as quais se instalam aletas.

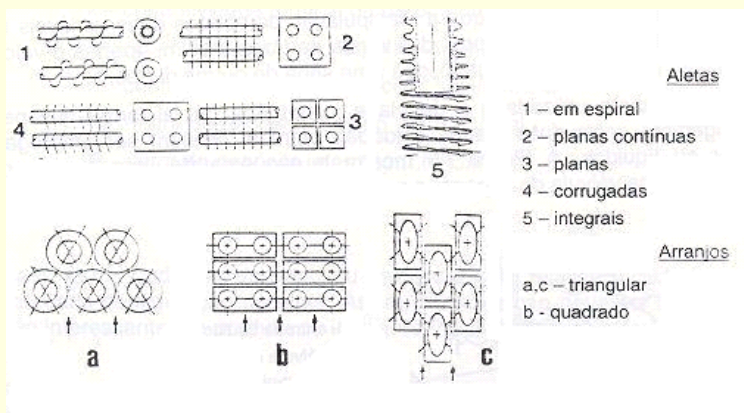


Evaporadores com aletas

- Aletas:
 - São instaladas nos espaços abertos entre as serpentinas;
 - Aumentam a área da superfície externa do evaporador;
 - Devem ter bom contato com a serpentina \Rightarrow soldadas ou fixas na superfície externa do tubo;
 - Espaçamento entre aletas:
 - T abaixo de $0^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ 2 a 3 aletas em 2cm
 - T maiores \Rightarrow até 14 aletas em 2cm

Evaporadores com aletas

- Tipos de Aletas:



Evaporadores com aletas

■ Tipos de Aletas:



Em espiral



Planas



Corrugadas

Evaporadores com aletas

- Em evaporadores com serpentinas aletadas, que operam à baixa temperatura, a formação de gelo (neve) no evaporador é inevitável:
 - Aumenta a resistência à condução de calor, que deverá ser considerada no cálculo de U .
 - A neve assume efeito de isolante;
 - Aumenta a resistência à circulação de ar.

Evaporadores com aletas

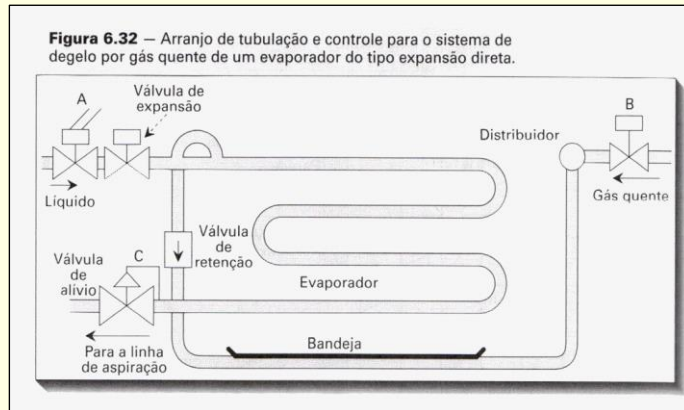
- Formas de degelo:
 - **Interrupção do refrigerante no evaporador e deixa o ventilador funcionando:**
 - O gelo se funde quando o ar de retorno fica abaixo de 0°C;
 - Operação pode ser manual ou automática.
 - **Desvantagem:** a T de estocagem sobe durante o degelo. Período necessário para o degelo é longo;
 - Opera bem em estocagem acima de 2°C.

Evaporadores com aletas

- Formas de degelo:
 - **Emprego de gás quente:**
 - O ventilador é desligado;
 - O gás de descarga do compressor é circulado no evaporador;
 - Método rápido;
 - Requer mais tubulações e válvulas;
 - Melhor sistema mas, o custo inicial é mais elevado.

Evaporadores com aletas

- Emprego de gás quente



Evaporadores com aletas

- Formas de degelo:

- **Aspersão de água:**

- Aspersão de água sobre o evaporador após parada do sistema frigorífico;
- É rápido, assim a temperatura da câmara é elevada à níveis aceitáveis;
- Água quente do condensador pode ser usada;
- É necessário um dreno para recolher a água e cuidado para que a água não seja lançada sobre o produto.

Evaporadores com aletas

- Formas de degelo:
 - **Elétrico:**
 - Resistência elétrica no interior do evaporador;
 - Custo inicial é baixo e tem curto período de operação;
 - Maior consumo de energia que os outros métodos;
 - Para câmaras de pequeno porte.

Evaporadores com aletas

- Vantagens dos evaporadores com aletas:
 - As aletas proporcionam maior área de troca térmica;
 - Maior será a área de superfície por unidade de comprimento e largura que os evaporadores de superfície primária (tubo liso e placa);
 - Para uma mesma capacidade frigorífica estes evaporadores ocupam menos espaço e material.

Métodos de alimentação do líquido refrigerante

- Expansão seca;
- Expansão úmida, inundado ou sobre-alimentado

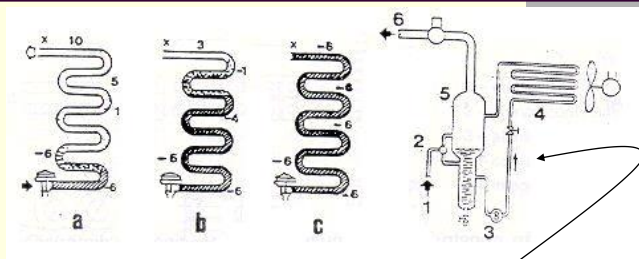
Expansão seca

- O refrigerante líquido estará na forma de vapor na saída do evaporador para entrar na linha de sucção do compressor;
- A alimentação do refrigerante é controlada por uma válvula de expansão termostática ou termostática com equalização externa;
 - T do vapor aumenta na saída do evaporador \Rightarrow aquece o bulbo da válvula \Rightarrow a pressão exercida pelo fluido do bulbo no diafragma abre a válvula \Rightarrow entra mais refrigerante \Rightarrow vapor sairá mais frio \Rightarrow fecha a válvula.
- A superfície interna dos tubos não permanece molhada todo o tempo \Rightarrow diminui o coeficiente de transferência de calor;
- T varia ao longo do evaporador.

Expansão seca

- Ao final do evaporador o vapor refrigerante deve estar superaquecido \Rightarrow 10 a 20 % da superfície do evaporador é usada para isso;
- São menos eficientes que os evaporadores que trabalham inundados mas são os mais populares:
 - Mais simples e compactos;
 - Baixo custo inicial;
 - Menos problemas de retorno de óleo;
 - Usados principalmente para halogenados (CFC, HCFC e HFC)

Expansão seca



a e b: expansão seca
c: expansão úmida

Evaporador inundado:

1. Entrada de líquido;
2. Controle de nível;
3. Bomba;
4. Evaporador;
5. Separador de líquido;
6. Sucção.

Expansão úmida (inundado)

- Operam totalmente cheios de líquido refrigerante;
- A transferência de calor é mais efetiva (transição de fase);
- O líquido que sai do evaporador segue para um tanque separador de líquido:
 - Tanque acima da serpentina: circulação ocorre por gravidade;
 - Tanque no mesmo nível ou abaixo: utiliza-se bomba (comum na refrigeração industrial, para equipamentos com muito evaporadores).
- Para evitar saída de líquido para o compressor ⇒ separador de líquido somente vapor será aspirado pelo compressor.

Expansão úmida (inundado)

- Neste tipo de evaporador é circulado de 2 a 7 vezes mais líquido do que poderia ser vaporizado;
 - Taxas mais elevadas para R-717;
- Controle da alimentação:
 - Redução no orifício de entrada do evaporador;
 - Válvulas de expansão automática ou manual.
- Emprego:
 - Sistemas industriais com pouca variação na carga térmica;
 - Ciclos de múltiplos estágios.

Método de alimentação de ar

- Evaporadores com convecção natural de ar;
- Evaporadores com convecção forçada de ar.

Método de alimentação de ar

- Circulação de ar no espaço refrigerado é essencial para a movimentação do fluxo de calor do ambiente e produto para o evaporador.
- Circulação de ar inadequada
 - Baixo fluxo de ar:
 - Diminui a capacidade do evaporador;
 - Baixa taxa de resfriamento do produto;
 - Taxa de ar excessiva:
 - Maior evaporação da umidade na superfície do produto;
 - Desidratação, aparência inadequada e menor tempo de vida útil.

Método de alimentação de ar

- A taxa de circulação de ar desejável varia com as aplicações e dependem:
 - Da umidade da câmara;
 - Do tipo de produto;
 - Da embalagem do produto.
- A condição do produto na estocagem depende dos efeitos combinados da umidade e velocidade da circulação de ar

Método de alimentação de ar

- Propriedades do ar úmido:
 - Evaporadores \Rightarrow resfriamento de ar;
 - No resfriamento de ar deve-se conhecer a relação ar/vapor d' água que irá passar pelas serpentinas;
 - Principal ferramenta: Carta psicrométrica.
 - **Ex:** Ar, a uma vazão volumétrica de $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ entra em uma serpentina a 4°C e 90% de umidade relativa. Na saída da serpentina este ar se encontra à $0,5^\circ\text{C}$ e umidade relativa de 98%.
 - a) Qual a capacidade de refrigeração da serpentina?
 - b) Qual a taxa de remoção de água do ar?

Evaporadores com convecção natural de ar

- Utilizado em condições onde a velocidade do ar desejada seja baixa, para evitar desidratação do produto.
- Instalações típicas de emprego:
 - Refrigeradores domésticos;
 - Expositores frigoríficos;
 - Resfriadores móveis e transitáveis (caminhão);
 - Grandes câmaras de armazenamento refrigerado

Evaporadores com convecção natural de ar

- A circulação do ar através das serpentinas do evaporador é função do diferencial de T entre o evaporador e o espaço refrigerado
 - Quanto maior o $\Delta T \Rightarrow$ maior a circulação de ar;
- Devem ser instalados mais alto possível do piso \Rightarrow ar frio é mais denso que ar quente;
- O tamanho e quantidade depende das dimensões do espaço refrigerado;
- São, normalmente de tubo liso ou placas;
 - Quando de tubo liso podem abranger toda a extensão da câmara;
 - Placas defletoras são instaladas para direcionar o fluxo livre de ar sobre a serpentina

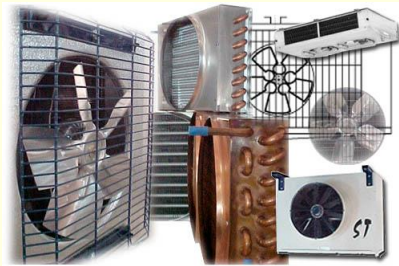
Evaporadores com convecção forçada de ar

- Evaporadores com ventiladores acoplados que aspira ou descarrega o ar sobre a superfície do evaporador, lançando-o sobre o produto.
- Proporciona:
 - Melhor distribuição de ar;
 - T mais uniforme na câmara;
 - Maior eficiência na transmissão de calor.
- Utilizado em refrigeração industrial e comercial.

Evaporadores com convecção forçada de ar

- Construção:
 - serpentina onde passa o refrigerante;
 - Construídas em cobre: evaporadores menores;
 - Construídas em aço: evaporadores grandes que empregam R-717;
 - aletas para aumentar a transferência de calor;
 - ventiladores destinados à circulação de ar;
 - bandeja para recolher água condensada;
 - pontos para fixar o evaporador;

Evaporadores com convecção forçada de ar



Evaporadores com convecção forçada de ar

- O desempenho do evaporador é afetado:
 - Pela circulação e velocidade do ar;
 - Distribuição do ar no espaço refrigerado e sobre a serpentina.

- Importante:
 - Circulação do ar deve ser distribuído igualmente sobre o espaço refrigerado e serpentina.
 - Fraca distribuição \Rightarrow T desiguais \Rightarrow Pontos mortos na câmara e funcionamento ineficiente das serpentinas

Evaporadores com convecção forçada de ar

- Velocidade do ar:
 - Baixa
 - ar fica muito tempo em contato com a superfície das serpentinas \Rightarrow menor a taxa de transferência de calor;
 - Alta
 - aumenta a quantidade de ar em contato com a serpentina por tempo \Rightarrow maior a taxa de transferência de calor;
 - quebra a fina película de ar estagnado adjacente às superfícies (barreira de calor que isola a superfície).

Evaporadores com convecção forçada de ar

- A capacidade de resfriamento depende da quantidade de ar circulado sobre o evaporador:
- Volume de ar:
 - 30 m³/min/ton \Rightarrow para baixas velocidades do ar;
 - 70 m³/min/ton \Rightarrow para altas velocidades.
- Velocidade do ar (m/min) é função da quantidade de ar (m³/min) e da área de face do evaporador

$$\text{Velocidade (m/min)} = \frac{\text{Quantidade de ar (m}^3 \text{ / min)}}{\text{Área de face (m}^2\text{)}}$$

Evaporadores com convecção forçada de ar

■ Ventiladores:

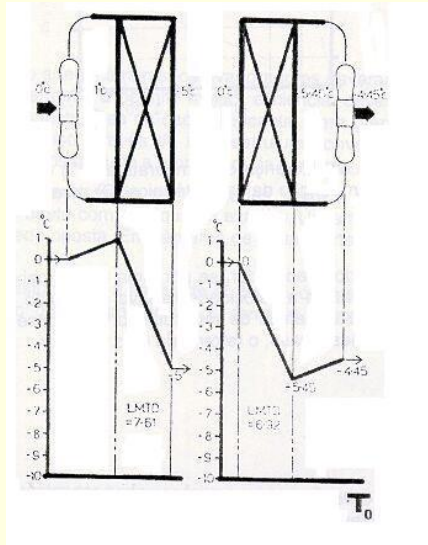
- Para maior v do ar \Rightarrow maior o consumo de energia dos ventiladores;
- Quanto maior o volume de ar \Rightarrow maior é a DLMT \Rightarrow a área do evaporador necessária será menor ($S \downarrow$) \Rightarrow maior será a energia consumida.

Evaporadores com convecção forçada de ar

■ Ventiladores:

- **Ar insuflado sobre o evaporador;**
- **Ar aspirado do evaporador:** o calor cedido pelo motor aumenta a T do ar. Arranjo utilizado quando se deseja aumentar o alcance do fluxo de ar.

Evaporadores com convecção forçada de ar



Evaporadores com convecção forçada de ar

■ Instalação

- Parte superior das paredes ou no teto;
- Devem manter distância das paredes de acordo com a recomendação de cada fabricante;
- Não devem ser instalados sobre a porta de entrada da câmara: evitar contato com o ar quente.
- Usualmente são dispostos nas paredes laterais à porta ou na parede oposta;
- Em câmara de grande porte podem ser instalados na parte central superior;
- O alcance do fluxo de ar (flecha) deve ser estudado.

Capacidade do evaporador

- A capacidade do evaporador, é a taxa a qual o calor passará do ambiente refrigerado ou produto, através das paredes, para o fluido refrigerante;
- A capacidade é determinada pelos fatores que controlam o calor de condução:

$$Q = S \times U \times D$$

Capacidade do evaporador

- A resistência ao fluxo de calor oferecida pelas paredes do evaporador é a soma de 3 fatores:

$$\frac{1}{U} = \frac{R}{f_i} + \frac{L}{K} + \frac{1}{f_e}$$

- f_i = fator de condutância da película da superfície interna;
- L/K = resistência ao fluxo de calor do metal dos tubos e aletas;
- f_e = fator de condutância da película da superfície externa;
- R = relação entre a superfície externa e interna.

Capacidade do evaporador

- Para melhor taxa de transferência de calor \Rightarrow U deve ser alto:
 - U de metais (aço, cobre, latão, alumínio) é alto \Rightarrow oferece pouca interferência à passagem do fluxo de calor;
 - U é determinado principalmente pelos coeficientes de condutância das películas das superfícies externa e interna.

Capacidade do evaporador

- Considerações sobre a superfície interna:
 - A condução de calor é maior através de líquidos \Rightarrow evaporadores inundados são mais eficientes que aqueles que operam por expansão seca;
 - Depósito na superfície interna atuam como isolante térmico:
 - Acúmulo de óleo lubrificante do compressor;
 - Bolhas de vapor da ebulição do refrigerante que aderem à superfície interna quando a velocidade do fluxo é baixa;
 - Altas velocidades no escoamento do refrigerante produz ação de limpeza nas paredes internas e evitam formação de bolha:
 - A velocidade é limitada pela queda de pressão permitida no evaporador

Capacidade do evaporador

- Considerações sobre a superfície externa:
 - Depósitos na superfície externa que pode diminuir a transferência de calor:
 - Acúmulo de poeira;
 - Borra;
 - Graxa e outros contaminantes;
 - Neve ⇒ evaporadores que operam a baixa temperatura.
 - Em evaporadores com circulação forçada de ar a resistência externa é diminuída pelo aumento da velocidade do ar.

Capacidade do evaporador

- Coeficiente global de transferência de calor para diferentes tipos de evaporadores

Expansão seca	Temperatura na Câmara (°C)	U (kcal/m ² h°C)	
		Natural	Forçada
Tubo liso	0	16	20-25
Tubo aletado	0	7	11-13

Capacidade do evaporador

- Diferença Logarítmica Média de Temperatura (DLMT)
 - A T do ar diminui quando passa através das serpentinas;
 - A queda de T é maior na primeira fileira e diminui quando o ar passa através de cada fileira seguinte.

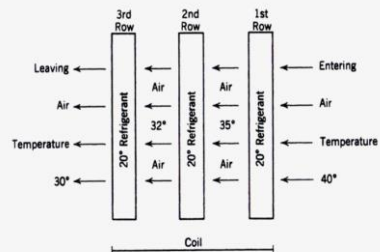


Fig. 15-2 Air temperature drop across typical three-row cooling coil.

Capacidade do evaporador

- A média aritmética não descreve corretamente o perfil de T através das serpentinas;
- Assim o perfil de T através das serpentinas é dado pela DLMT.

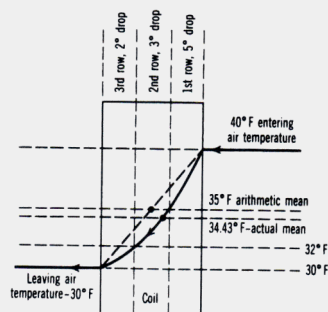


Fig. 15-1 Mean temperature of air passing through evaporator.

Capacidade do evaporador

$$D = \frac{(T_e - T_r) - (T_l - T_r)}{\ln \frac{(T_e - T_r)}{(T_l - T_r)}}$$

- D = temperatura média logarítmica;
- T_e = temperatura do ar que entra na serpentina;
- T_r = temperatura do refrigerante nos tubos;
- T_l = temperatura do ar que deixa a serpentina;

Resfriadores de líquidos

- Evaporadores de expansão direta:
 - Superfície de transmissão de calor na qual o líquido refrigerante é expandido para refrigerar o ambiente ou produto;
 - Contato direto com o material ou espaço a ser refrigerado.
- Casos em que a expansão direta é inconveniente:
 - Pasteurizadores de alimentos líquidos (leite, bebidas fermentadas, etc);
 - Resfriamento de alimentos por imersão (aves, cortes de aves, etc).

Resfriadores de líquidos

- Nos resfriadores de líquido ocorre o resfriamento de água ou salmoura pelo emprego da expansão direta;
- O líquido resfriado é bombeado, em tubulações apropriadas, para o espaço ou produto que deve ser resfriado;
- Líquido resfriado é chamado de refrigerante secundário e retorna para o resfriador de líquido para ser resfriado e bombeado novamente.

Resfriadores de líquidos

Resfriadores de tubo duplo:

- Dois tubos dispostos um dentro do outro;
- O refrigerante secundário flui no tubo interior e o refrigerante no tubo externo em contra-corrente;
- Requerem muito espaço e por isso são pouco usados.

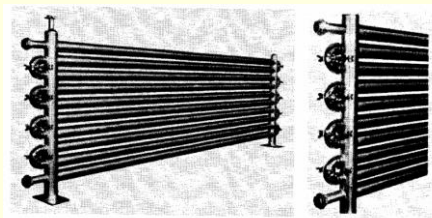


Fig. 14-20 Double-pipe chiller. Removable return bends (right) are designed to make tube readily accessible for cleaning. (Courtesy of Vilter Manufacturing Company.)

Resfriadores de líquidos

Resfriadores tipo tanque aberto:

- Serpentina de tubo liso (onde ocorre a expansão direta) em um tanque que contém o refrigerante secundário;
- Agitador para circular o líquido;
- São usadas em qualquer aplicação para esfriamento de líquidos onde a higiene não seja um fator principal;

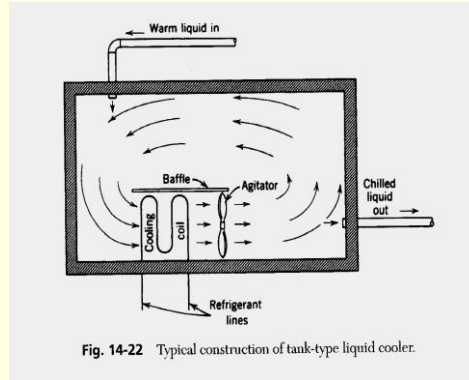


Fig. 14-22 Typical construction of tank-type liquid cooler.

Resfriadores de líquidos

Resfriadores de carcaça e serpentina:

- Serpentina em espiral de tubo liso encerrada em uma carcaça de aço soldada;
- O refrigerante secundário é resfriado na carcaça;
- Usado quando a higiene é limitante;
- Se o líquido congelar o equipamento será danificado (fechado);

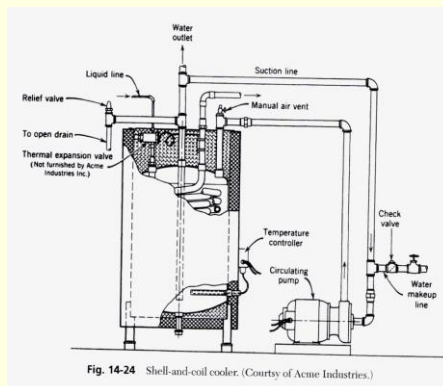
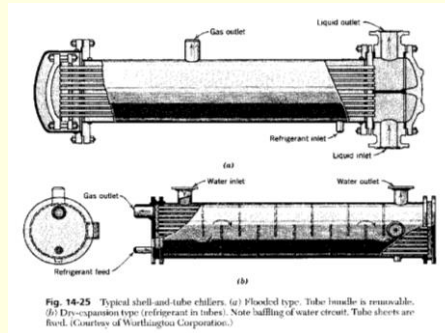


Fig. 14-24 Shell-and-coil cooler. (Courtesy of Acme Industries.)

Resfriadores de líquidos

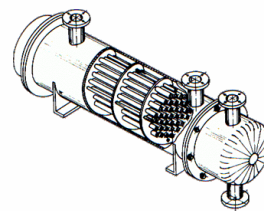
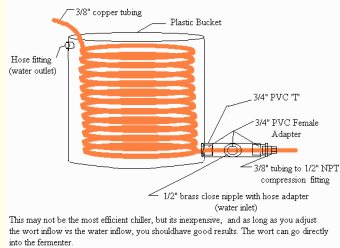
- **Tipo tubo e carcaça:**

- Pode ser operado via expansão seca ou inundada:
 - **Expansão seca:** o refrigerante é expandido dentro dos tubos e o líquido é circulado na carcaça;
 - **Operação inundada:** o líquido é circulado através dos tubos e o refrigerante na carcaça.



Resfriadores de líquidos

Zymico® El-Cheapo Chiller®



- **Mais usuais:**

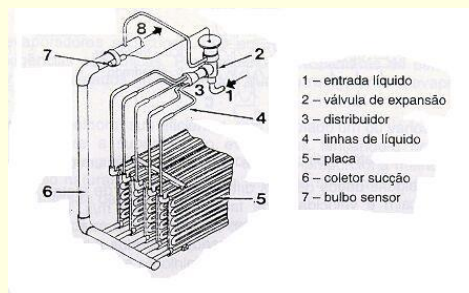
- **Tipo tubo e carcaça**
- **Tanque aberto**

Temperatura de evaporação

- Na definição da capacidade de um evaporador a temperatura exerce influência direta, assim quanto maior o diferencial de temperatura (DLMT) entre a T do refrigerante e o meio (ar) maior a capacidade do evaporador;
- A T do refrigerante no interior do evaporador terá que ser menor que a T do produto ou do espaço a ser refrigerado:
 - A T do processo terá que ser mantida a mesma;

Temperatura de evaporação

- **Para que a T do refrigerante não seja alterada deve-se:**
 - Evitar perda de pressão elevada no lado do refrigerante;
 - Dividir a serpentina em vários circuitos alimentados ao mesmo tempo por um distribuidor de refrigerante líquido.



Temperatura de evaporação

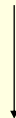
- Um compressor de amônia que opera com refrigerante condensado a 35°C e com capacidade para 50 TR apresenta os valores da potência (BHP: potência absorvida ou potência na ponta do eixo) necessária para diferentes valores de temperaturas de evaporação (de 0°C a -20°C).

Temperatura de evaporação (°C)	BHP	BHP/TR	% de aumento
0	45,0	0,9	-
-5	54,6	1,09	21
-10	64,6	1,30	44
-15	78,1	1,56	73
-20	92,9	1,86	107

Seleção de evaporadores

- Seleção Básica:

Determinado: Q (carga térmica), T do processo e as dimensões da câmara



Catálogo de fabricantes.