

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS E INSTALAÇÕES

PROF. RAMÓN SILVA



Engenharia de Energia

Dourados MS - 2013

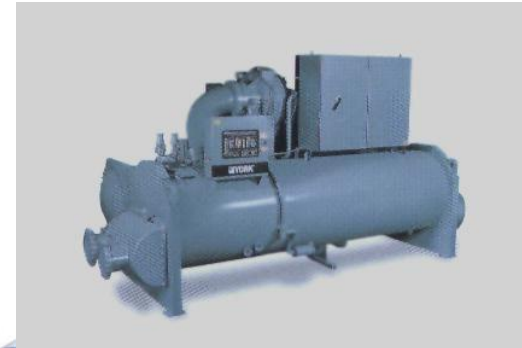


SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

- O compressor é um dos principais componentes do sistema de refrigeração.
- Sua função é aumentar a pressão do fluido refrigerante e promover a circulação desse fluido no sistema.

- Os principais tipos de compressores utilizados são:

- alternativo,
- centrífugo,
- de parafusos,
- palhetas e Scroll.



- A escolha do tipo de compressor depende, essencialmente, da capacidade da instalação, que pode ser dividida, em termos de temperatura de vaporização e do fluido refrigerante utilizado em:
 - pequena capacidade ($< 2,5$ TR), média capacidade (entre $2,5$ e 75 TR)
 - grande capacidade (> 75 TR).
- TR significa tonelada de refrigeração, uma expressão comumente utilizada em refrigeração para traduzir a energia necessária para liquefazer uma tonelada de gelo em 24 horas ($1\text{TR} = 3,5$ kw).

- De acordo com as características do processo de compressão, os compressores utilizados em refrigeração podem ser classificados como:
 - máquinas de deslocamento positivo ou
 - máquinas de fluxo.

- O compressor de deslocamento positivo aumenta a pressão do vapor de fluido refrigerante pela redução do volume interno de uma câmara de compressão por meio de uma força mecânica aplicada.
- Os compressores alternativos, de parafusos, de palhetas e Scroll são de deslocamento positivo.

- O único compressor classificado como máquina de fluxo em sistemas de refrigeração é o centrífugo.
- Nesse tipo de compressor o aumento de pressão se deve, principalmente, à conversão de pressão dinâmica em pressão estática.

- Dependendo da concepção de construção, os compressores podem ser classificados como:
 - herméticos,
 - semi-herméticos e
 - abertos.

- No compressor hermético, tanto o compressor propriamente dito quanto o motor de acionamento são alojados no interior de uma carcaça, apresentando como acesso de entrada e saída apenas as conexões elétricas do motor.



- Este tipo de compressor opera exclusivamente com refrigerantes halogenados e o vapor de fluido refrigerante entra em contato com o enrolamento do motor, resfriando-o.
- São geralmente utilizados em refrigeradores domésticos e condicionadores de ar com potências da ordem de 30kW



- Os compressores semi-herméticos são semelhantes aos herméticos, porém permitem a remoção do cabeçote, tornando possível o acesso às válvulas e aos pistões.



- Nos compressores do tipo aberto o eixo de acionamento do compressor atravessa a carcaça, permitindo o acionamento por um motor externo.
- Este tipo de compressor é adequado para operar com amônia, podendo também utilizar refrigerantes halogenados.



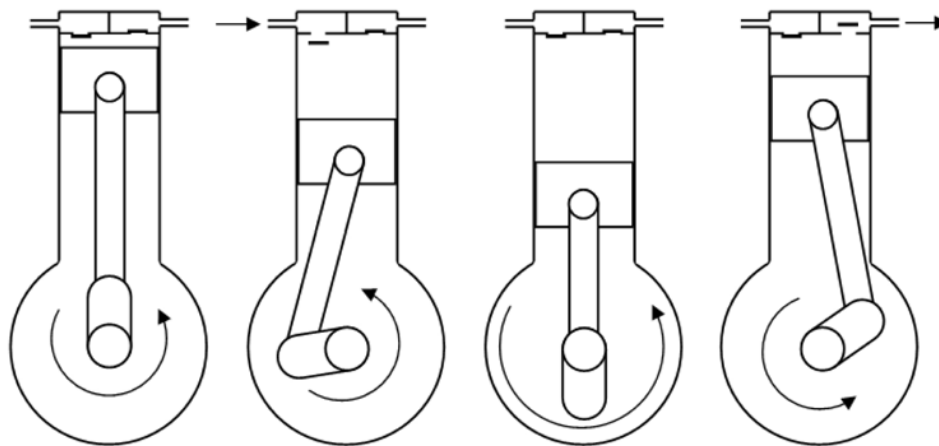
Abb. ähnlich / Fig. similar, © Bitzer

- Os compressores alternativos são os mais utilizados em sistemas de refrigeração.
- Encontram-se em estágio de desenvolvimento bastante avançado e são amplamente utilizados em sistemas de pequena e média capacidade.

- São fabricados com capacidades que variam desde uma fração de TR até cerca de 200 TR (de 1 a 700kW).
- Os refrigerantes HCFC-22, HFC-134a, HFC-404A, HFC-407A e HFC-407C são freqüentemente utilizados com estes compressores em sistemas de ar condicionado para conforto e processos.
- o refrigerante R-717 (amônia) é utilizado em sistemas de refrigeração industrial.

- Os compressores alternativos podem ser:
 - de simples ou duplo efeito;
 - de um ou mais cilindros;
 - abertos, herméticos ou semi-herméticos; e
 - horizontais, verticais, em V, em W ou radiais.

- A Figura apresenta, esquematicamente, o princípio de funcionamento de um compressor alternativo.



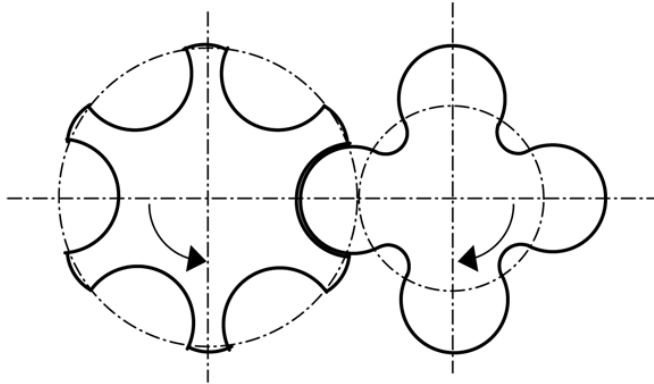
- Durante a expansão do êmbolo, gás refrigerante é aspirado pela válvula de admissão.
- Durante a compressão, o êmbolo comprime o refrigerante, empurrando-o para fora através da válvula de descarga, localizada normalmente no cabeçote do cilindro.

- Os compressores parafuso podem ser classificados como: de parafuso simples e de parafuso duplo.



- Os compressores de parafuso duplo são mais utilizados que os simples, devido ao fato de apresentar eficiência isentrópica ligeiramente maior, em torno de 3 a 4%.

- A Figura apresenta um corte transversal dos rotores de um compressor de parafuso duplo.



- O rotor macho aciona o rotor fêmea, que fica alojado em uma carcaça estacionária.

- O refrigerante entra pela parte superior em uma das extremidades e sai pela parte inferior da outra extremidade.



- Quando o espaço entre os ressaltos passa pela entrada, a cavidade é preenchida pelo refrigerante, pois em rotação contínua o refrigerante retido na cavidade move-se, circulando pela carcaça do compressor, até encontrar um ressalto do rotor macho, que começa a se encaixar na cavidade do rotor fêmea, reduzindo o volume da cavidade e comprimindo o gás.

- Ao atingir o orifício de saída, ocorre a descarga, devido ao encaixe do ressalto na cavidade.

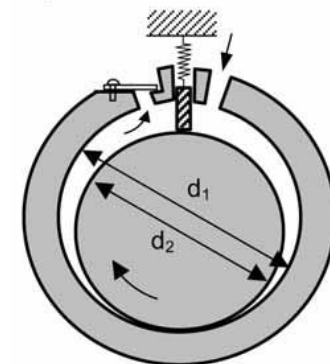


- Com a finalidade de lubrificação e vedação, óleo é adicionado ao sistema.
- Assim, em sistemas operando com compressores parafuso torna-se necessário à instalação de um separador de óleo.

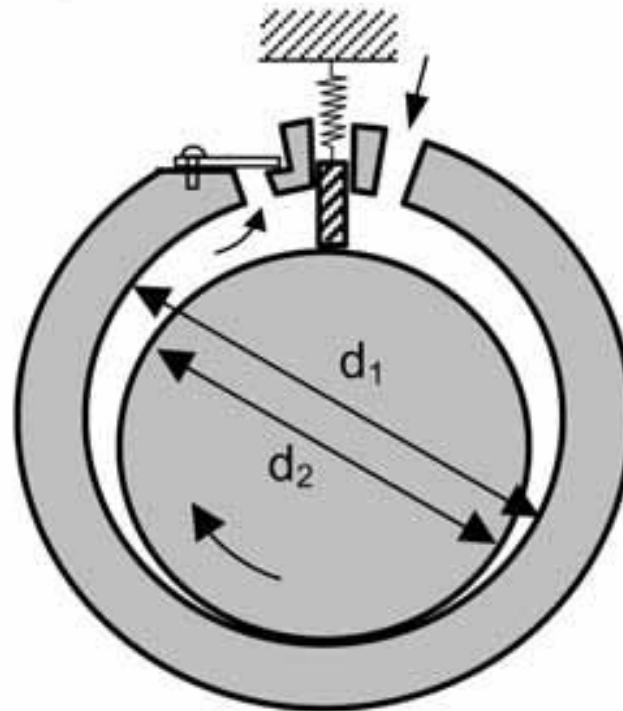
- A capacidade de resfriamento dos compressores de parafuso duplo está na faixa de 20 a 1300TR (70 a 4570kW).
- Capacidades de resfriamento entre 50 e 350TR (176 a 1230kW) são normalmente utilizadas.
- A relação de pressão em compressores parafuso pode ser da ordem de 20:1 em simples estágio.

- Os refrigerantes HCFC-22, HFC-134a e HFC-407C são normalmente empregados em compressores parafuso para condicionamento de ar para conforto.
- A amônia (R-717) é utilizada para aplicações industriais.

- Compressor de palheta simples.
- Nesse tipo de compressor, a linha de centro do eixo de acionamento coincide com a do cilindro, porém é excêntrica em relação ao rotor, de maneira que o rotor e o cilindro permanecem em contato à medida que gira.
- Uma palheta simples, acionada por mola, divide as câmaras de aspiração e descarga.

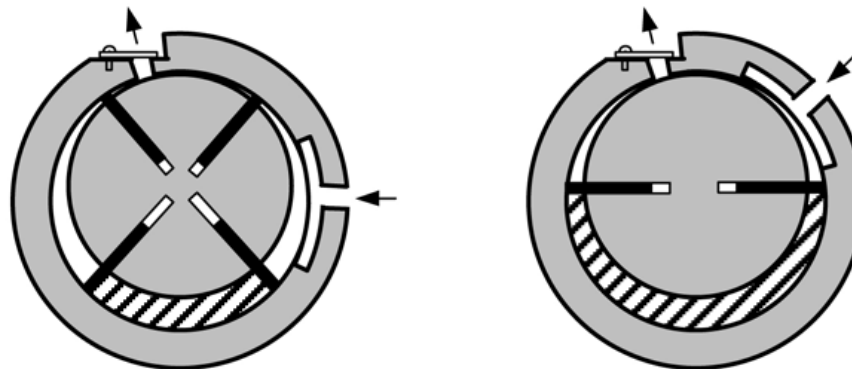


- Compressor de palheta simples.

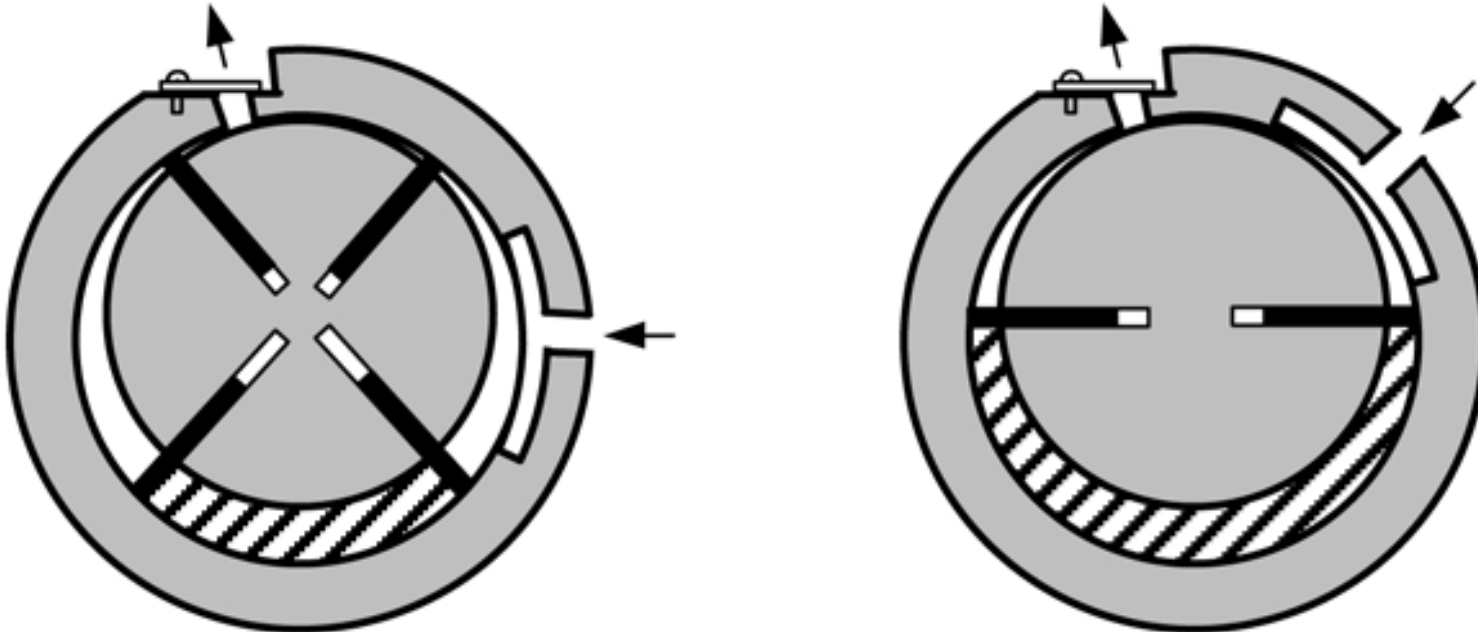


- O HCFC-22 é o refrigerante mais utilizado nesse tipo de compressor.
- Os refrigerantes HFC-407C e HFC-410A são seus substitutos.
- A eficiência mecânica típica de um compressor de palhetas operando com uma relação de pressão de 3,5 é de 0,87.

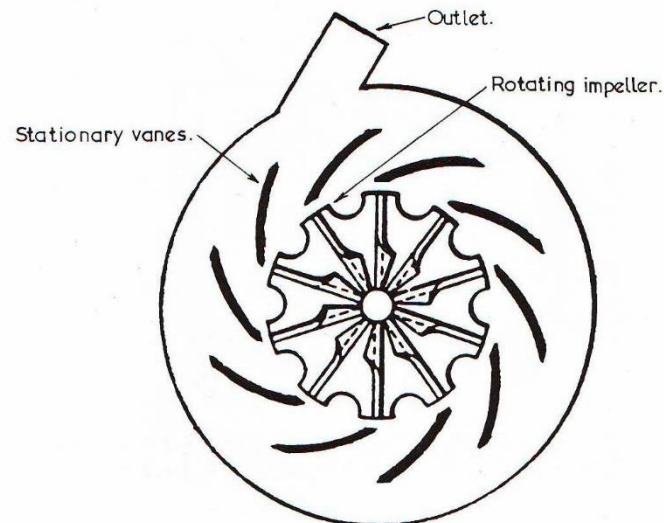
- Compressores de múltiplas palhetas.
- Nesses compressores o rotor gira em torno do próprio eixo, que não coincide com o eixo do cilindro.
- O rotor possui duas ou mais palhetas, que permanecem em contato com a superfície do cilindro pela ação da força centrífuga.



- Compressores de múltiplas palhetas.

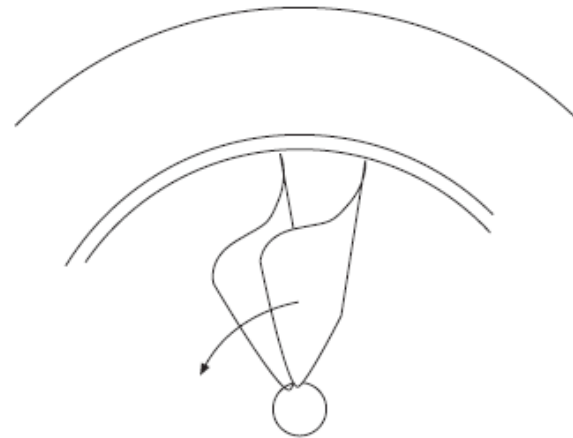
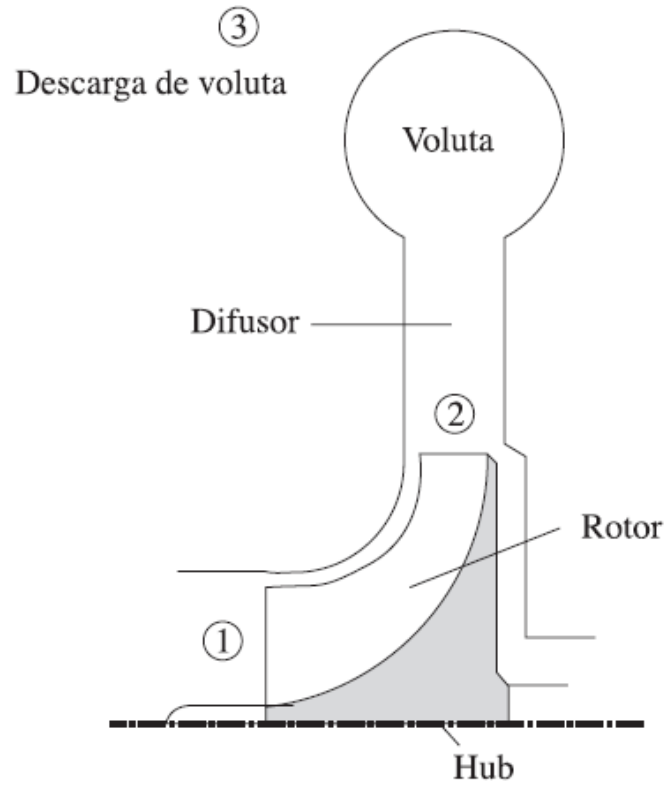


- Os compressores centrífugos foram introduzidos em instalações frigoríficas por Willis Carrier, em 1920.
- São amplamente utilizados em sistemas de grande porte. Seu princípio de funcionamento é semelhante ao de uma bomba centrífuga.



- O refrigerante entra pela abertura central do rotor e, devido à ação da força centrífuga, ganha energia cinética à medida que é deslocado para a periferia.
- Ao atingir as pás do difusor ou a voluta, parte de sua energia cinética é transformada em pressão.
- Em situações em que são necessárias altas razões de pressão, podem-se utilizar compressores de múltiplos estágios.

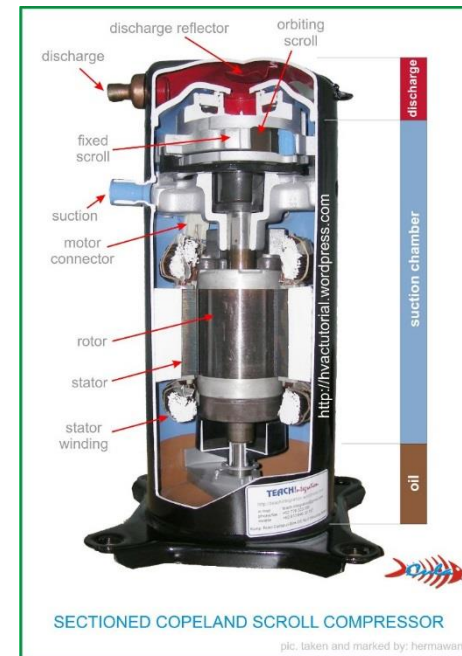
COMPRESSOR CENTRÍFUGO



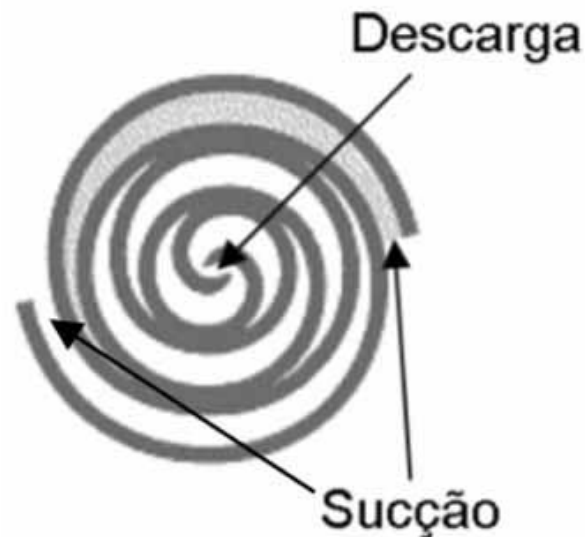
- O compressor Scroll foi inventado em 1905 pelo engenheiro francês Léon Creux.
- Na época, a tecnologia disponível não era avançada o suficiente para permitir a fabricação de um protótipo, devido a, principalmente, problemas de vedação.
- Para um funcionamento efetivo, o compressor Scroll requer tolerâncias de fabricação muito pequenas, que foram atendidas apenas a partir da segunda metade do século 20

- O princípio de funcionamento do compressor Scroll, baseado num movimento orbital, difere fundamentalmente do tradicional compressor a pistão, baseado num movimento alternativo, apresentando diversas vantagens como:
 - eficiência de 5 a 10 % maior que um compressor alternativo de igual capacidade;
 - ausência de válvulas;
 - menor quantidade de partes móveis em relação a um compressor alternativo;
 - operação suave e silenciosa; e
 - baixa variação de torque com conseqüente aumento da vida útil e redução de vibração.

- Para realizar o trabalho de compressão, o compressor Scroll possui duas peças em forma de espiral, encaixadas face a face, uma sobre a outra.
- A espiral superior é fixa e apresenta uma abertura para a saída do gás.
- A espiral inferior é móvel, acionada por um motor com eixo excêntrico



- A sucção do gás ocorre na extremidade do conjunto de espirais e a descarga ocorre através da abertura da espiral fixa
- A espiral superior possui selos que deslizam sobre a espiral inferior, atuando de maneira semelhante aos anéis do pistão de um compressor alternativo, garantindo a vedação do gás entre as superfícies de contato das espirais.



- A capacidade de refrigeração dos compressores Scroll, para sistemas de expansão direta, está na faixa de 1 a 15 TR (52,3 kW).
- Para resfriadores (Chiller), está na faixa de 10 a 60 TR (35 a 210kW).

- Os compressores Scroll possuem alta eficiência volumétrica, variando de 96,9 a 93,6% para um aumento de relação de pressão de 2,77 para 3,58.
- Para relações de pressão em torno de 3, a eficiência isentrópica é de 70%.
- Os compressores Scroll possuem maior COP (3,35) em relação aos compressores rotativos e alternativos..

- O HCFC-22 é o refrigerante utilizado atualmente em compressores Scroll.
- Os refrigerantes HFC-407C e HFC-410A são, em longo prazo, seus substitutos.
- O ano previsto para o fim da fabricação do refrigerante HCFC-22 em países desenvolvidos é 2020.
- Já em países em desenvolvimento, tal refrigerante deixará de ser fabricado em 2040.

- Os condensadores resfriados a ar são normalmente utilizados como parte integrante de unidades produzidas em fábricas (unidades condensadoras) de pequena ou média capacidade.
- Grandes condensadores a ar também podem ser aplicados nas situações em que não é econômica a utilização de sistemas resfriados a água, devido ao alto custo ou à indisponibilidade da água.
- A faixa de capacidades mais comum destes condensadores cobre a gama de valores de 1 a 100 TR (7 a 352 kW), porém é usual a sua montagem em paralelo, atingindo capacidades bastante superiores.

CONDENSADORES RESFRIADOS A AR

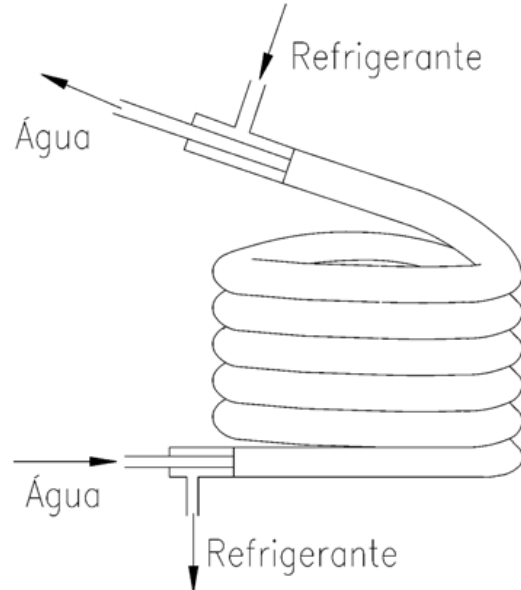


- Condensadores resfriados a água, quando limpos e corretamente dimensionados, operam de forma mais eficiente que os condensadores resfriados a ar, especialmente em períodos de elevada temperatura ambiente.
- Normalmente, estes condensadores utilizam água proveniente de uma torre de resfriamento.
- A temperatura de condensação, por sua vez, deve ser fixada em um valor entre $5,0^{\circ}\text{C}$ e $8,0^{\circ}\text{C}$ maior que a temperatura da água que entra no condensador, isto é, da água que deixa a torre.

- Condensador duplo tubo
- Este tipo de condensador é formado por dois tubos concêntricos, geralmente de 1 1/4” para o tubo interno e de 2” para o externo.
- O tubo por onde circula a água é montado dentro do tubo de maior diâmetro.



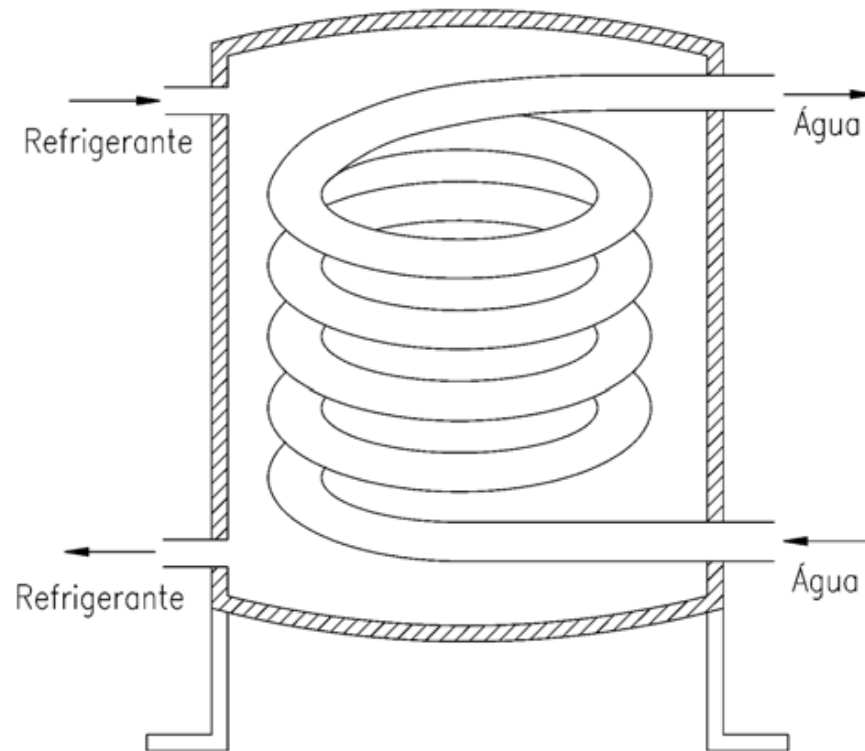
- Condensador duplo tubo
- O fluido refrigerante, por sua vez, circula em contracorrente no espaço anular formado pelos dois tubos, sendo resfriado ao mesmo tempo pela água e pelo ar que está em contato com a superfície externa do tubo de maior diâmetro.



- Condensador duplo tubo
- Estes condensadores são normalmente utilizados em unidades de pequena capacidade ou como condensadores auxiliares, operando em paralelo com condensadores a ar, somente nos períodos de carga térmica muito elevada.
- Esses condensadores são difíceis de se limpar e não fornecem espaço suficiente para a separação de gás e líquido.

- Condensador carcaça e serpentina (Shell and Coil)
- Este tipo de condensador é constituído por um ou mais tubos, enrolados em forma de serpentina, que são montados dentro de uma carcaça fechada.
- A água de resfriamento flui por dentro dos tubos, enquanto o refrigerante a ser condensado escoar pela carcaça.
- É usado em unidades de pequena e média capacidade, tipicamente até 15 TR.

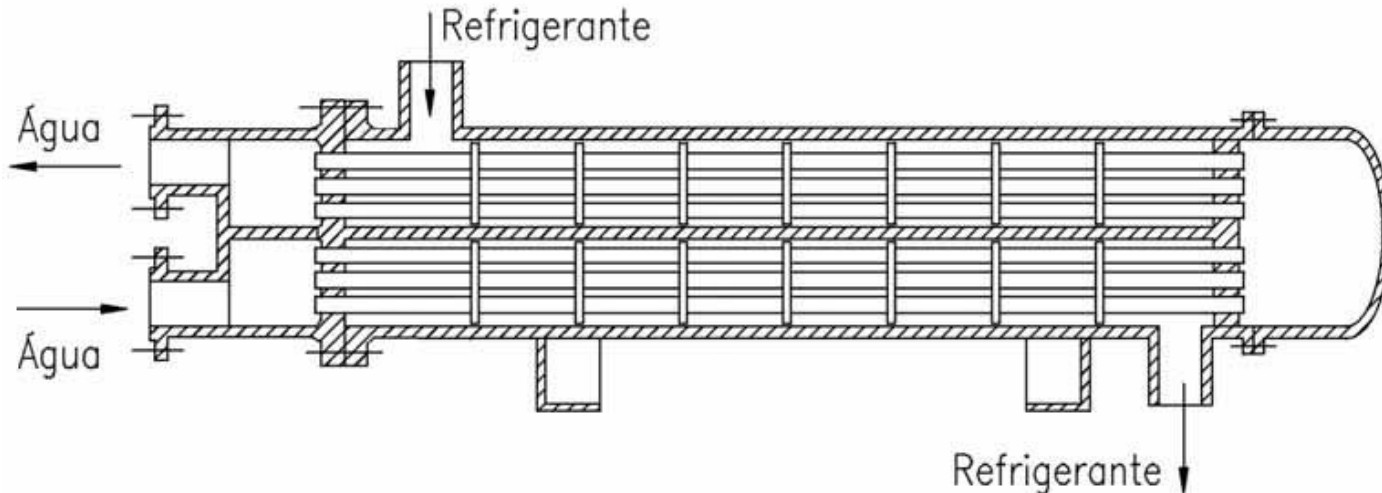
- Condensador carcaça e serpentina (Shell and Coil)



- Condensador carcaça e tubo (Shell and tube)
- Este tipo de condensador é constituído de uma carcaça cilíndrica, na qual é instalada determinada quantidade de tubos horizontais e paralelos, conectados a duas placas dispostas em ambas as extremidades.
- A água de resfriamento circula por dentro dos tubos e o refrigerante escoar dentro da carcaça, em volta dos tubos.

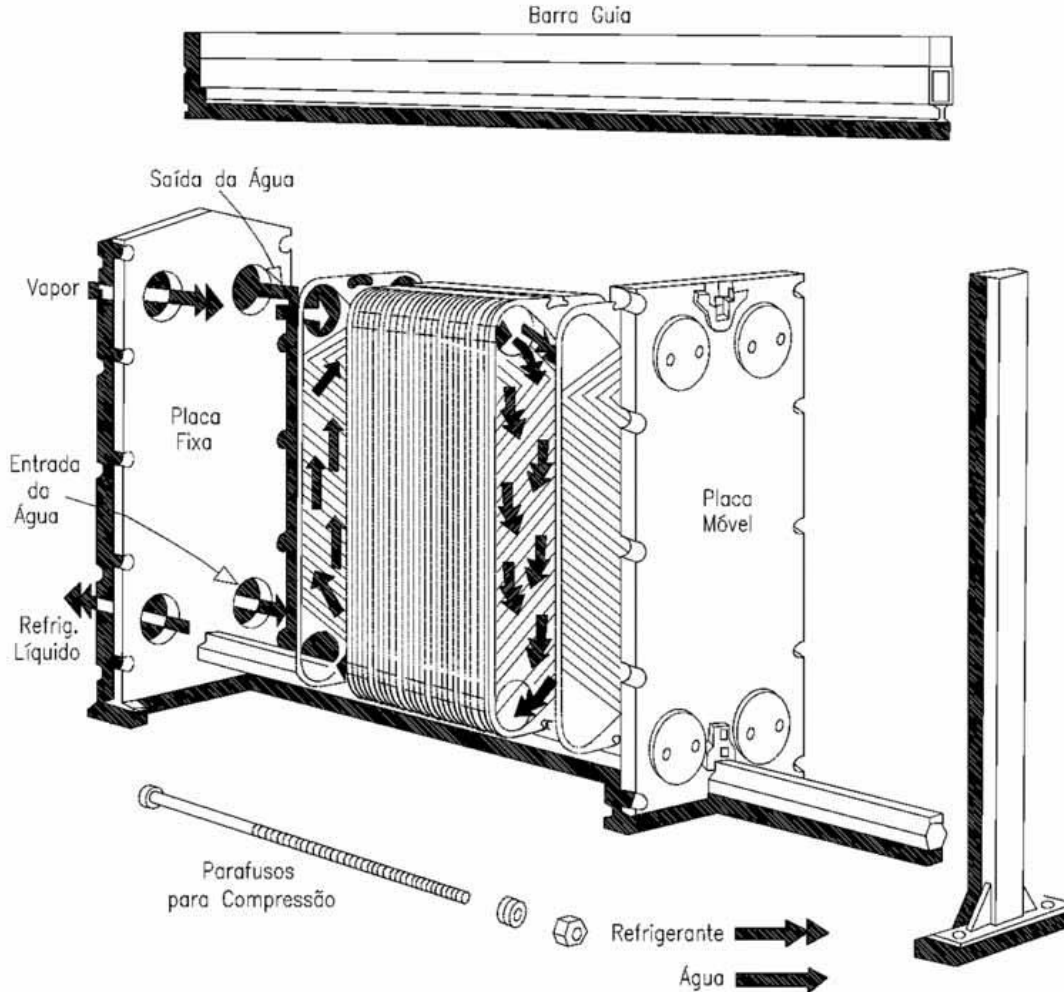


- Condensador carcaça e tubo (Shell and tube)
- Os tubos são de cobre e os espelhos de aço são para hidrocarbonetos halogenados.
- Para amônia, tanto os tubos como os espelhos devem ser de aço.



- Condensador de placa
- Este tipo de condensador é geralmente constituído de placas de aço inox ou, em casos especiais, de outro material, de pequena espessura (0,4 a 0,8 mm).
- As placas são montadas paralelamente umas as outras, com um pequeno afastamento (1,5 a 3,0mm).
- A água de resfriamento e o fluído frigorífico circulam entre espaços alternados, formados pelas placas.

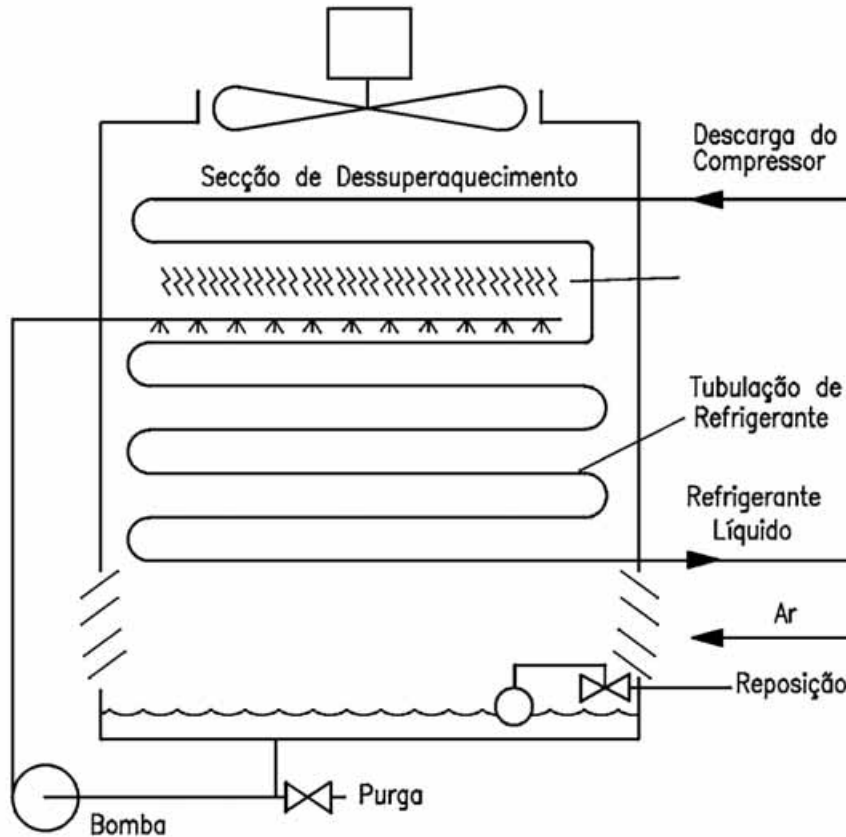
- Condensador de placa



- Condensadores evaporativos
- Este tipo de condensador é formado por uma espécie de torre de resfriamento de tiragem mecânica, no interior da qual é instalada uma série de tubos, por onde escoam o fluído refrigerante .
- No topo destes condensadores são instalados bicos injetores que pulverizam água sobre a tubulação de refrigerante.
- A água escoa, em contracorrente com o ar, em direção à bacia do condensador.

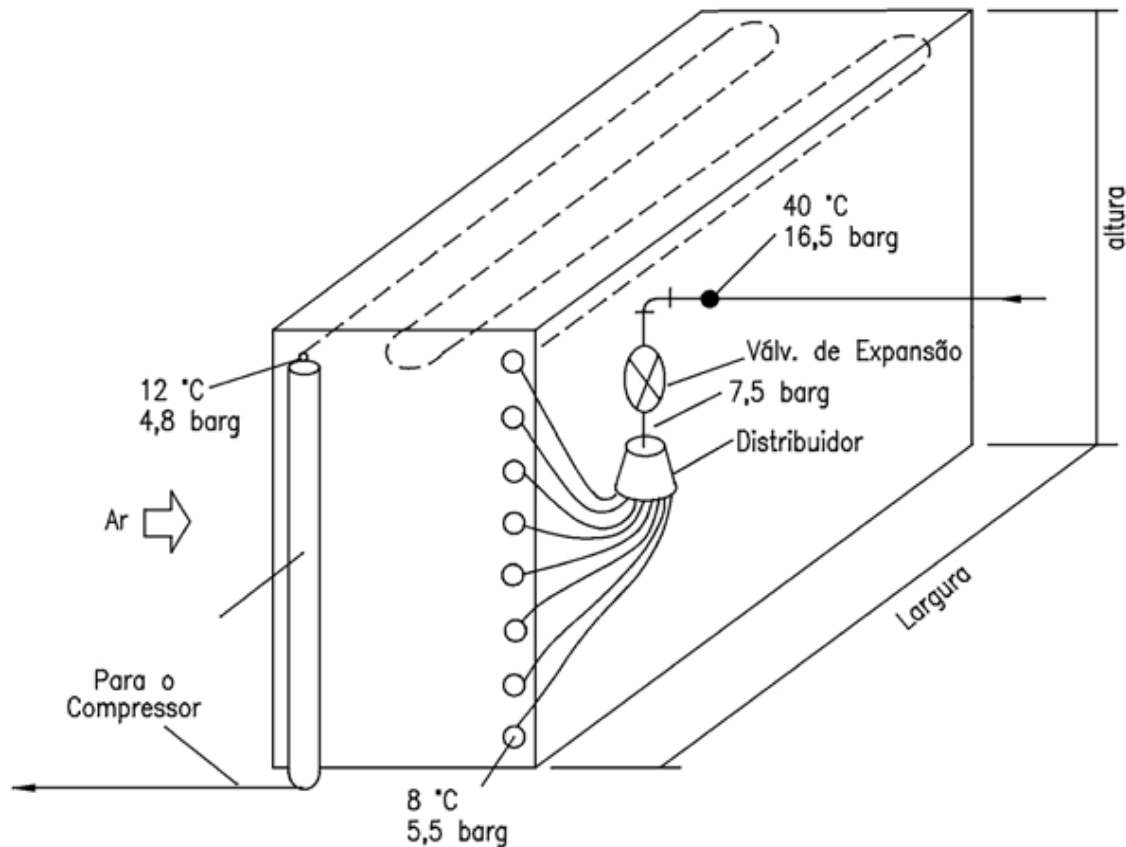
- Condensadores evaporativos
- O contato da água com a tubulação por onde escoo o refrigerante provoca a sua condensação.
- Ao mesmo tempo, uma parcela da água evapora e, num mecanismo combinado de transferência de calor e massa entre a água eo ar, esta última é também resfriada.
- A água que chega à bacia do condensador é recirculada por uma bomba, e a quantidade de água é mantida por meio de um controle de nível (válvula de bóia), acoplado a uma tubulação de reposição

- Condensador Evaporativo



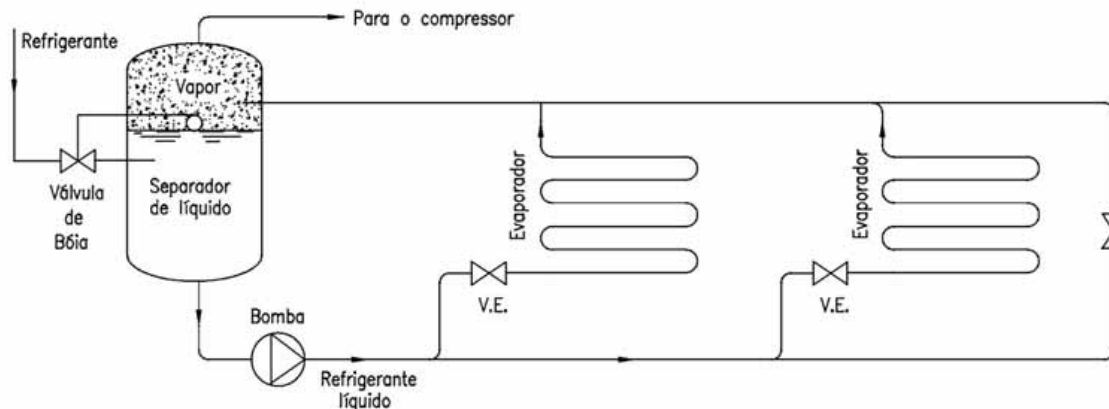
- Evaporador seco (ou de expansão direta)
- O refrigerante entra no evaporador, de forma intermitente, através de uma válvula de expansão, geralmente do tipo termostática, sendo completamente vaporizado e superaquecido ao ganhar calor em seu escoamento pelo interior dos tubos.
- Assim, em uma parte do evaporador existe fluido frigorífico saturado (líquido + vapor) e na outra parte, fluido superaquecido.
- Este tipo de evaporador é bastante utilizado com fluidos frigoríficos halogenados, especialmente em instalações de pequena capacidade.

- Evaporador seco (ou de expansão direta)



- Evaporador Inundado
- O líquido, após ser admitido por uma válvula de expansão do tipo bóia, escoar através dos tubos da serpentina, removendo calor do meio a ser resfriado.
- Ao receber calor no evaporador, uma parte do refrigerante evapora, formando uma mistura de líquido e vapor, a qual, ao sair do evaporador, é conduzida até um separador de líquido.
- Este separador, como o próprio nome diz, tem a função de separar a fase vapor da fase líquida.

- Evaporador Inundado
- O refrigerante no estado de vapor saturado é aspirado pelo compressor, enquanto o líquido retorna para o evaporador, à medida que se faz necessário.
- Como existe líquido em contato com toda a superfície dos tubos, este tipo de evaporador usa de forma efetiva toda a sua superfície de transferência de calor, resultando em elevados coeficientes globais de transferência de calor.



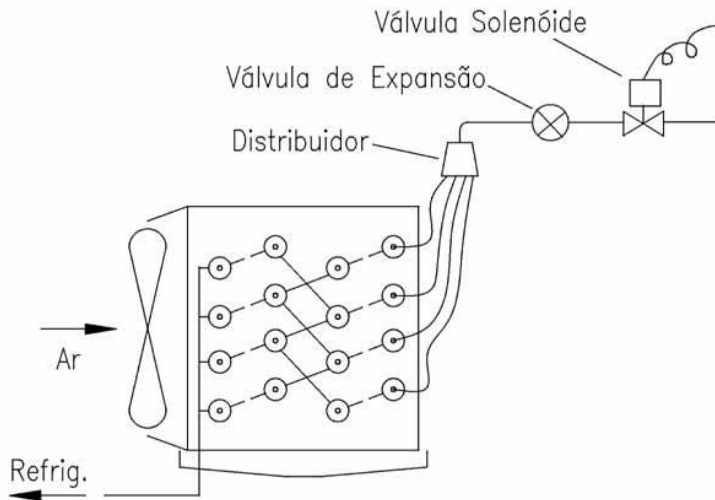
- Evaporador para o resfriamento de ar
- Neste tipo de evaporador, o fluido refrigerante, ao vaporizar no interior de tubos, aletados ou não, resfria diretamente o ar que escoou pela superfície externa do trocador de calor.
- O ar frio é então utilizado para resfriar os produtos contidos em uma câmara, balcão refrigerante, sala climatizada, etc.



- Evaporador com circulação natural do ar (convecção natural)
- Pode ser constituído tanto de tubos lisos quanto de tubos aletados, tendo sido bastante utilizados em situações em que se deseja baixa velocidade do ar e elevada umidade relativa no ambiente refrigerado.



- Evaporador com circulação forçada do ar
- O evaporador com circulação forçada (unit coolers ou frigidifusores) é atualmente o tipo mais utilizado em câmaras frigoríficas, salas de processamento e túneis de congelamento, sendo constituídos, basicamente, por uma serpentina aletada e ventiladores, montados em um gabinete compacto



- Evaporadores para o resfriamento de líquidos
- O líquido é resfriado até uma determinada temperatura e, então, é bombeado para equipamentos remotos, tais como serpentinas de câmaras frigoríficas e serpentinas de fan-coils, onde será utilizado para o resfriamento de uma outra substância ou meio.

- Evaporador carcaça e serpentina (Shell and Coil)
- Neste tipo de evaporador o fluido frigorífico escoia por dentro do tubo, que é dobrado em forma de serpentina, e o líquido circula por fora do mesmo.

- Evaporador carcaça e tubo (Shell and tube)
- Este tipo de evaporador é um dos mais utilizados na indústria de refrigeração para o resfriamento de líquidos.
- É fabricado em uma vasta gama de capacidades, podendo ser do tipo inundado, com alimentação por gravidade, em que o refrigerante evapora por fora dos tubos e o líquido a resfriar escoar por dentro dos tubos, ou
- de expansão direta ou de recirculação por bomba, em que o refrigerante escoar por dentro dos tubos e o líquido a resfriar escoar na parte de fora dos tubos

- Cascata ou baudelot
- Este tipo de evaporador é utilizado para o resfriamento de líquidos, normalmente água para processo, até uma temperatura em torno de $0,5^{\circ}\text{C}$ acima do seu ponto de congelamento.
- É projetado de forma que não seja danificado se houver congelamento do líquido.
- Os modelos mais antigos destes evaporadores eram constituídos de uma série de tubos, montados uns por cima dos outros, sobre os quais o líquido a resfriar escorre, numa fina película, sendo que o refrigerante circula por dentro deles.

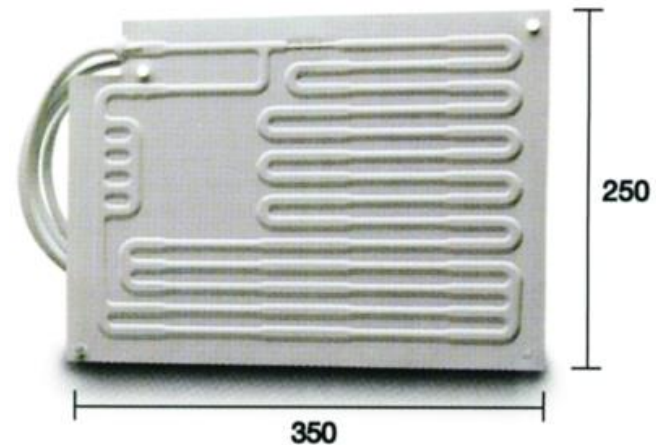
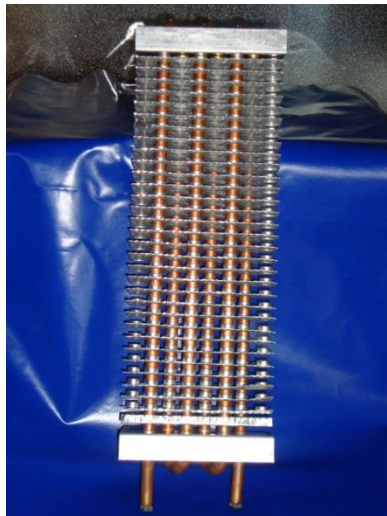
- Cascata ou Baudelot
- Os modelos mais recentes utilizam chapas estampadas e corrugadas de aço inoxidável, com as ondulações servindo de passagem para o refrigerante.



- Este evaporador também é muito utilizado na indústria de bebidas (cervejarias), bem como para o resfriamento de leite.

- Evaporadores de placas
- Da mesma forma que no caso dos condensadores, este tipo de evaporador está sendo utilizado cada vez mais, devido ao seu elevado coeficiente de transmissão de calor.
- Pode ser usado com alimentação por gravidade, recirculação por bomba ou por expansão direta (válvulas termostáticas).

- Evaporadores de placas
- É construído a partir de lâminas planas de metal interligadas por curvas de tubo soldadas a placas contíguas.
- Pode ser feita também de placas rebaixadas ou ranhuras e soldadas entre si, de modo que as ranhuras formem uma trajetória determinada ao fluxo do refrigerante.

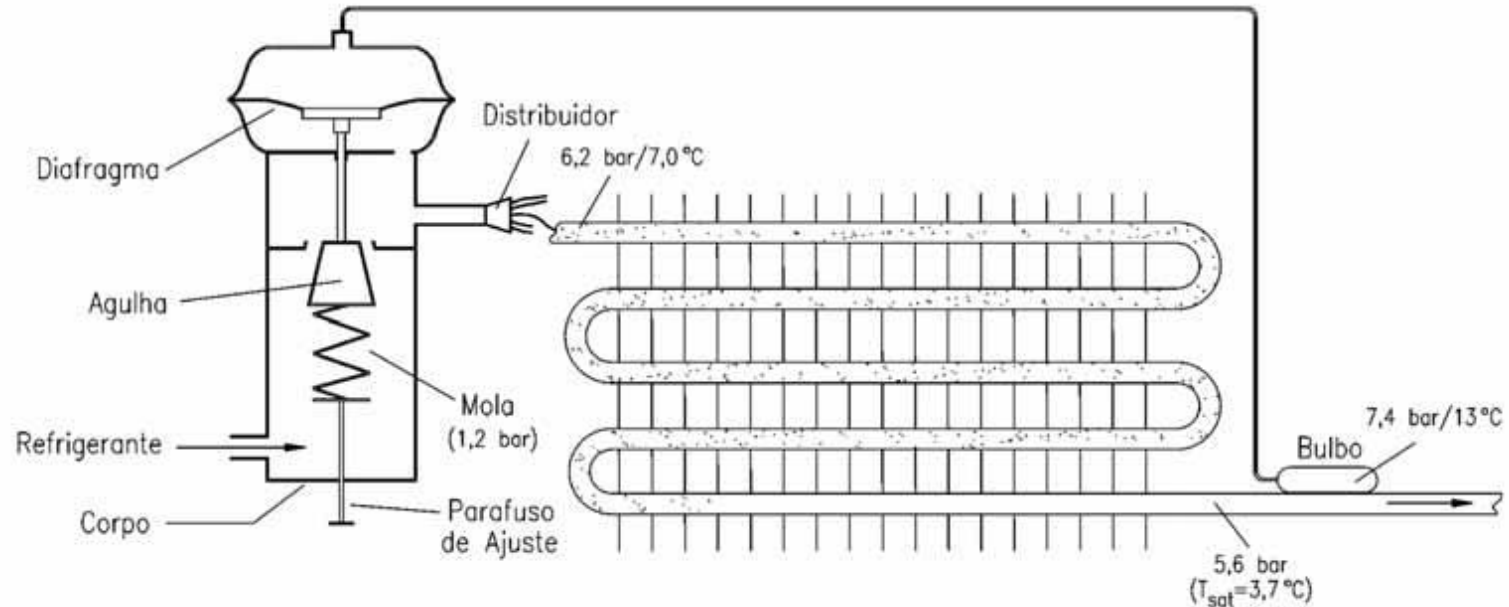


- Em um sistema de refrigeração, o dispositivo de expansão tem a função de reduzir a pressão do refrigerante desde a pressão de condensação até a pressão de vaporização.
- Ao mesmo tempo, este dispositivo deve regular a vazão de refrigerante que chega ao evaporador, de modo a satisfazer a carga térmica aplicada ao mesmo.

- Válvula de expansão termostática
- Devido a sua alta eficiência e a sua pronta adaptação a qualquer tipo de aplicação, as válvulas de expansão termostática (VET) são os dispositivos de expansão mais utilizados em sistemas de refrigeração de expansão direta.
- Elas regulam o fluxo de refrigerante que chega ao evaporador de forma a manter um certo grau de superaquecimento do vapor que deixa o mesmo.

- Válvula de expansão termostática
- Estas válvulas são constituídas de corpo, mola, diafragma, parafuso de ajuste e bulbo sensível.
- O bulbo, que contém em seu interior fluido refrigerante saturado do mesmo tipo que o utilizado no sistema refrigerante, é conectado com a parte superior do diafragma por meio de um tubo capilar e deve ser posicionado em contato com a tubulação de saída do evaporador, bem próximo a este.
- A saída da VET é conectada com a tubulação de entrada do evaporador.

- Válvula de expansão termostática



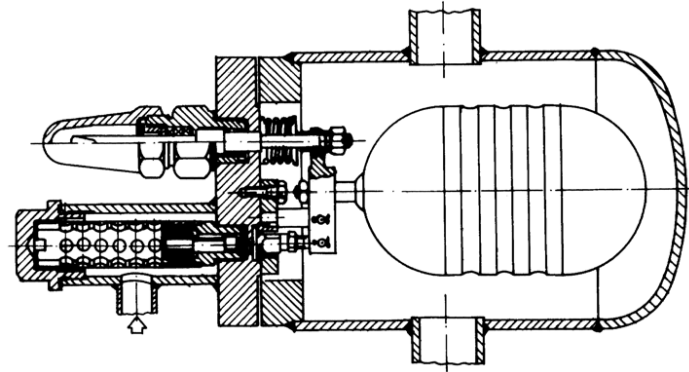
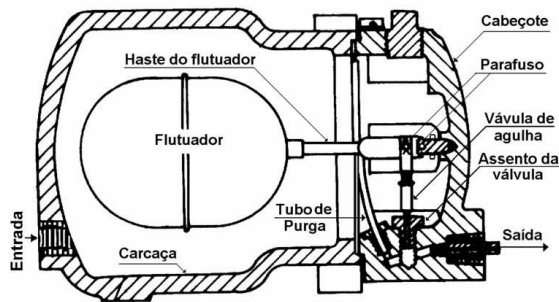
- Válvula de expansão termostática
- Quando o refrigerante passa através do orifício da válvula, a sua pressão é reduzida até a pressão de vaporização.
- O refrigerante líquido escoar através do distribuidor e dos tubos do evaporador, vaporizando-se à medida que recebe calor.
- Em determinada posição ao longo do comprimento dos tubos, todo o refrigerante líquido já se vaporizou.
- A partir deste ponto, qualquer fluxo adicional de calor provocará aumento da temperatura do refrigerante.
- Assim, quando alcança a saída do evaporador, o refrigerante apresenta pequeno grau de superaquecimento, com relação à temperatura de saturação, para a pressão de vaporização.

- Válvula de expansão termostática
- Se a carga térmica aumenta, mais refrigerante se vaporiza.
- Conseqüentemente a posição do ponto em que termina a vaporização do refrigerante se move em direção à entrada do evaporador.
- Isto causa aumento do superaquecimento do refrigerante, o que está
- associado a um aumento de temperatura na região onde está instalado o bulbo da válvula.
- Como dentro do bulbo existe refrigerante saturado, este aumento de temperatura provoca aumento de pressão no interior do mesmo e na parte superior do diafragma, faz a agulha obturadora mover para baixo, abrindo a válvula e aumentando a vazão de refrigerante.
- Assim, mais líquido entra no evaporador, de forma a satisfazer a carga térmica.

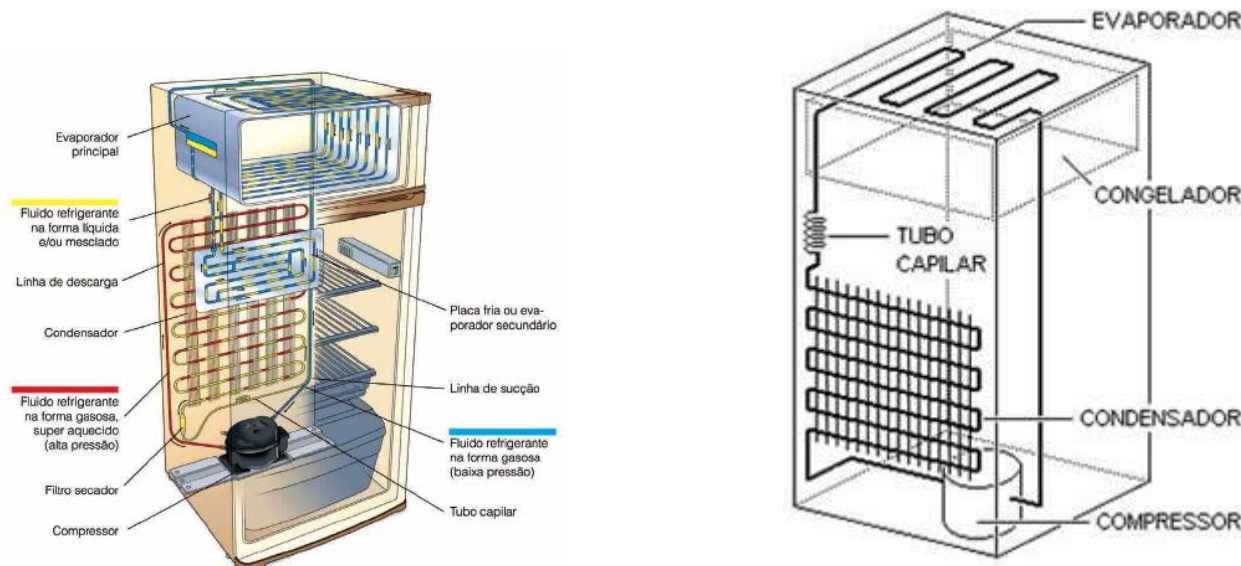
- Válvula de expansão termostática
- Se ocorrer diminuição da carga térmica, o superaquecimento do refrigerante na saída do evaporador tende a diminuir, o que provoca fechamento da válvula, diminuição da vazão de fluido frigorífico e aumento da diferença de pressão entre a entrada e a saída da válvula.
- O grau de superaquecimento pode ser ajustado pela variação da tensão impressa à mola da válvula.
- Maiores tensões na mola exigirão maiores pressões no bulbo para a abertura da válvula, o que implica maiores superaquecimentos.

- Válvulas de expansão eletrônicas
- As válvulas de expansão elétricas ou, mais precisamente, as eletrônicas ou microprocessadas, são capazes de promover um controle mais preciso e eficiente do fluxo de refrigerante, resultando em economia de energia.

- Válvulas de bóia
- Este é um tipo de válvula de expansão que mantém constante o nível de líquido em um recipiente, diretamente no evaporador ou nos separadores de líquido.



- Tubos capilares
- Nos sistemas de pequena capacidade (geladeiras, aparelhos de ar condicionado de janela, freezers, etc.) o dispositivo de expansão mais utilizado é o tubo capilar, que nada mais é que um tubo de pequeno diâmetro, com determinado comprimento, que conecta a saída do condensador com a entrada do evaporador.





REFERÊNCIAS

Eletrobrás, Procel, FUPAI – Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial– Manual Prático - 2005