

6 CONDENSADORES

São trocadores de calor aonde o refrigerante que vem do compressor a alta pressão e temperatura, troca calor com a água ou ar mudando de estado, passando de vapor para líquido-condensado.

Um condensador transfere calor em três fases: resfriamento sensível do gás superaquecido, transferência de calor latente na fase de condensação e sub-resfriamento do condensado. Condensação é sem dúvida o processo dominante em aplicações normais de refrigeração, respondendo por 83% da rejeição de calor.

Os meios de condensação mais comuns são ar e água, podendo haver meios especiais. Segundo o meio condensante os condensadores podem ser classificados em condensadores resfriados a água, condensadores resfriados a ar e condensadores evaporativos.

6.1 CONDENSADORES RESFRIADOS A ÁGUA:

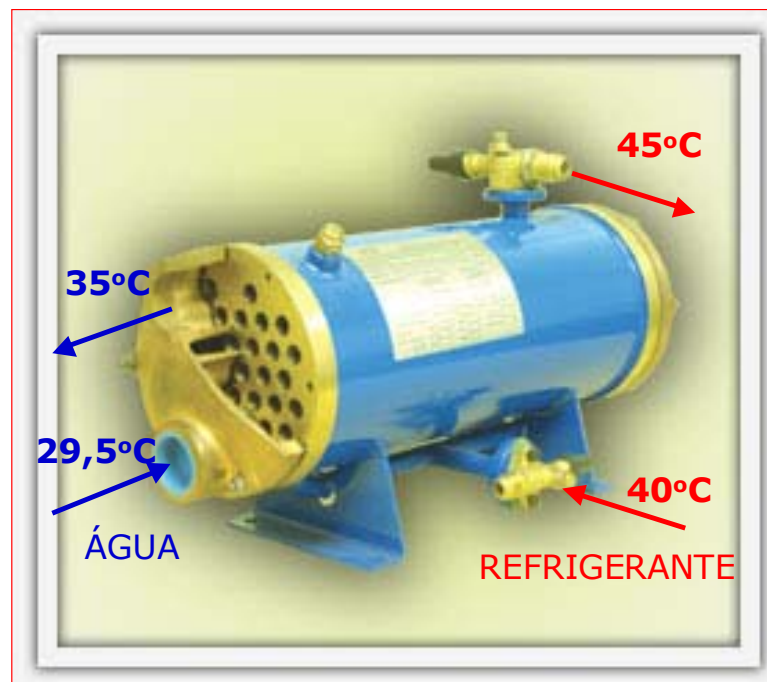
Os materiais mais usados nestes tipos de condensadores são: aço, cobre e latão, para os halogenados e aço para a amônia, R-717, pois o cobre e o latão são atacados pela amônia.

Os tipos mais comuns de condensadores resfriados a água são: shell-and-tube (tubo e carcaça), shell-and-coil (serpentina e carcaça) e tube-in-tube (tubo duplo).

O tipo a ser selecionado depende do tamanho da carga de refrigeração, o refrigerante usado, a qualidade e a temperatura da água de resfriamento disponível, a quantidade de água que pode ser circulada, a localização e o espaço disponível, as pressões operacionais exigidas (lados da água e refrigerante), custo, e considerações de manutenção.

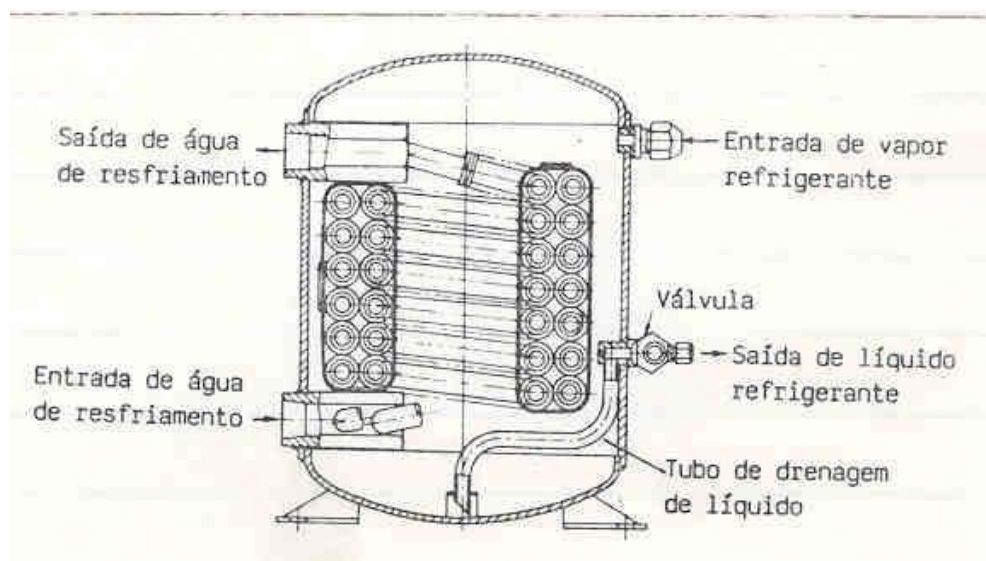
Os condensadores shell-and-tube (fig. 62) são construídos em tamanhos de 3,5 a 35000 kW. O refrigerante condensa fora dos tubos e a água de resfriamento circula internamente aos tubos em circuitos simples ou de multipassos. Tipicamente, os tubos do condensador shell-and-tube correm horizontalmente. Onde a área de instalação (planta baixa) é limitada, os tubos do condensador podem ser orientados verticalmente. Porém, tubos verticais apresentam uma condensação pobre que reduz o coeficiente de filme do refrigerante. Condensadores verticais com sistemas de água abertos são usados com amônia. Os tubos são limpos mecanicamente, circunstância que torna estes condensadores apropriados para aquelas instalações onde a qualidade da água é pobre e/ou outras condições de operação causam taxas elevadas de incrustação.

FIGURA 62 - CONDENSADOR RESFRIADO A ÁGUA SHELL-AND-TUBE



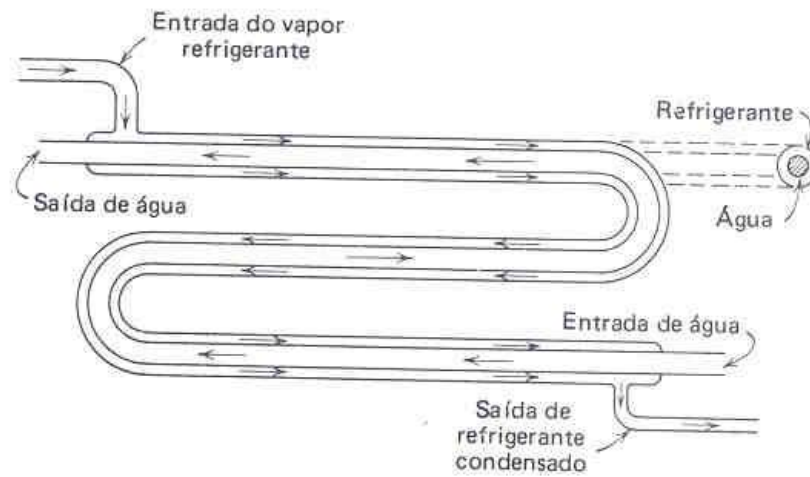
Os condensadores shell-and-coil (fig. 63) são construídos de uma ou mais serpentinas de tubo liso ou tubo com aletas encerradas numa carcaça de aço soldada em tamanhos de 1,8 a 53 kW. A água de condensação circula através das serpentinas, enquanto o refrigerante é contido na carcaça que circunda as serpentinas. Os condensadores shell-and-coil são limpos por circulação de produtos químicos através das serpentinas de água.

FIGURA 63 - CONDENSADOR RESFRIADO A ÁGUA SHELL-AND-COIL



Os condensadores tube-in-tube (fig. 64) consistem de dois tubos dispostos de tal modo que um fica no interior do outro. A água corre através de um tubo interno enquanto o refrigerante flui na direção oposta no espaço entre os tubos interno e externo. São construídos em tamanhos de 1 a 180 kW. Os condensadores tube-in-tube dependendo do tipo podem ser limpos mecanicamente ou por circulação de produtos químicos através dos tubos de água.

FIGURA 64 - CONDENSADOR RESFRIADO A ÁGUA TUBE-IN-TUBE



6.1.1 Capacidade do condensador

Normalmente, o calor rejeitado no condensador calor, $\dot{Q}_c$ pode ser determinado com precisão através dos valores conhecidos da carga do evaporador, $\dot{Q}_e$ e do calor equivalente da potência real requerida para compressão, $\dot{P}_c$ (obtida dos catálogos de fabricantes de compressores):

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_e + \dot{W}_{cp} \quad (47)$$

A vazão volumétrica de água de condensação requerida pode ser determinada por:

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}_c}{\rho \times c_p \times (t_s - t_e)} \quad (48)$$

onde

$\dot{V}$	vazão volumétrica de água de condensação, m ³ /h
$\dot{Q}_c$	calor rejeitado no condensador calor, kJ/h
ρ	densidade da água, 995 kg/m ³
c_p	calor específico da água, 4,183 kJ/kg°C
t_e	temperatura da água entrando no condensador, °C
t_s	temperatura da água saindo do condensador, °C

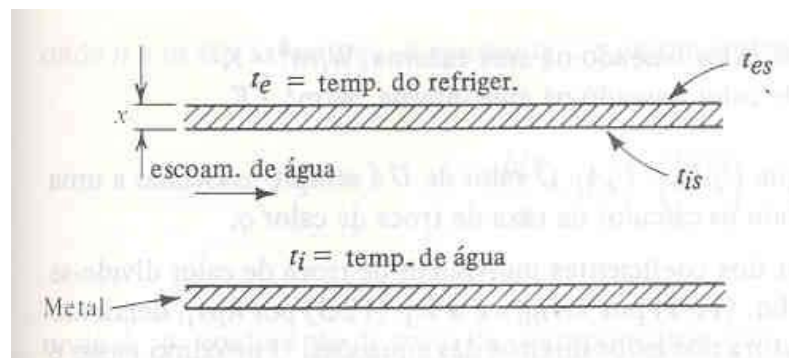
Uma vez que a transmissão de calor através das paredes do condensador (fig. 65) se faz por condução, a capacidade do condensador é função da equação fundamental de transferência de calor, dada por:

$$\dot{Q}_c = U \times A \times \text{LMTD} \quad (49)$$

onde,

$\dot{Q}_c$	capacidade do condensador, kJ/h
U	coeficiente global de transferência de calor, kJ/hm ² °C
A	área de superfície do condensador, m ²
LMTD	diferença de temperatura média logarítmica entre o refrigerante de condensação e o meio de condensação, °C

FIGURA 65 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR ENTRE O REFRIGERANTE E A ÁGUA ATRAVÉS DE UM TUBO

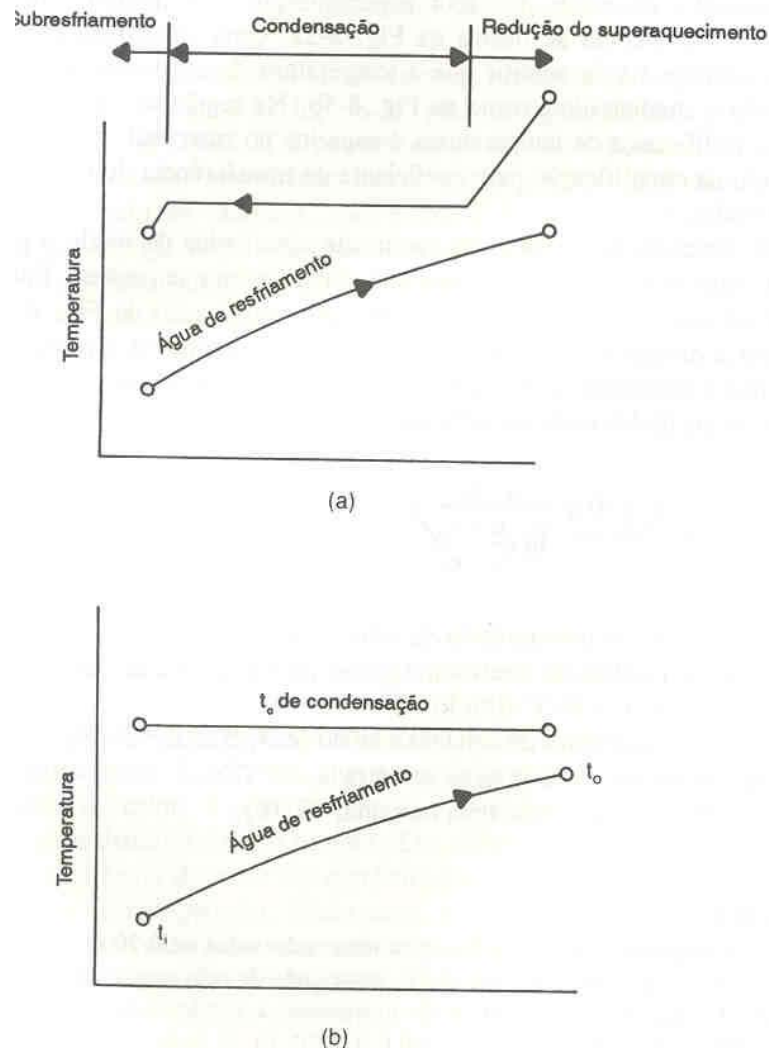


A distribuição de temperaturas ao longo do condensador é relativamente complexa, em virtude da ocorrência de regiões em que o refrigerante se encontra

no estado de vapor superaquecido e de líquido condensado subresfriado, como ilustra a (fig. 66a). Uma simplificação normalmente adotada é a de admitir que a temperatura de condensação se estenda a todo o condensador, como na (fig. 66b). Na região de vapor superaquecido, a diferença de temperaturas é superior no caso real, erro que é compensado na simplificação pelo coeficiente de transferência de calor, superior ao real. Esta aproximação usualmente resulta em resultados razoavelmente precisos.

Os condensadores reais são raramente circuitados de modo a proporcionar esquemas de correntes paralelas ou de contra correntes. Entretanto, tal aspecto não é importante em face da simplificação da (fig. 66b), para a qual a diferença média de temperaturas, LMTD é indiferente a circuitação, uma vez que a temperatura de um dos fluidos permanece constante.

FIGURA 66 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS AO LONGO DE UM CONDENSADOR RESFRIADO A ÁGUA - a) real; b) simplificado.



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

$$LMTD = \frac{(t - t_e) - (t - t_s)}{\ln \frac{(t - t_e)}{(t - t_s)}} \quad (50)$$

onde,

t_c temperatura de condensação do refrigerante, °C

O coeficiente global de transmissão de calor em um condensador resfriado a água com a água circulando dentro dos tubos pode ser calculado por:

$$U_o = \frac{1}{(A_o/A_i)/h_w + (A_o/A_i)r_{fw} + (t/k)(A_o/A_m) + 1/(h_r\phi_w)} \quad (51)$$

onde,

U_o coeficiente global de transferência de calor baseado na superfície externa e a LMTD, kJ/hm²°C

A_o/A_i relação entre a área da superfície externa e interna do tubo

h_w coeficiente de filme interno lado da água, W/m²°C

r_{fw} fator de incrustação no lado da água, m²°C/W

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 circumferencial média da parede de metal do tubo

h_r coeficiente de filme externo no lado do refrigerante, W/m²°C

ϕ_w eficiência da aleta (100% para tubos não aletados)

Para condensadores onde o refrigerante flui dentro dos tubos, a eq. (51), em termos do lado da superfície da água, pode ser escrita como:

$$U = \frac{1}{(A_o/A_i)/h_r + r_{fw} + (t/k) + 1/h_w} \quad (52)$$

onde,

h_r coeficiente de filme interno no lado do refrigerante, W/m²°C

h_w coeficiente de filme externo lado da água, W/m²°C

Os coeficientes de filme do lado da água e do refrigerante podem ser calculados através das equações do capítulo 3 e 4 do livro *Fundamentals Volume* da ASHRAE.

Quando a água atravessa o condensador, a sujeira da superfície do tubo no lado da água, é causada principalmente por sólidos minerais que precipitam fora da água e aderem à superfície do tubo. O depósito então formado sobre o tubo, não somente reduz o coeficiente de transmissão do lado da água, mas também tende a restringir o tubo de água e reduz a quantidade de água circulada, situações que causam sérios aumentos na pressão de condensação. Além da incrustação e corrosão, bactérias na água também podem formar um limo no lado da água.

A maioria dos fabricantes de condensadores resfriados a água fornece as capacidades do condensador para tubos limpos e para diversas etapas de deposição do tubo de acordo com os fatores de incrustação. Deve sempre ser usado um fator de incrustação mínimo de 0,00009 m²°C/W na seleção do

condensador resfriado a água. Os tubos do condensador devem ser limpos freqüentemente.

Conhecido $\dot{Q}_c$ e U , obtém-se A .

Na prática, adota-se a quantidade de calor a extrair no condensador, $\dot{Q}_c = [1,1 \text{ a } 1,35] \dot{Q}_e$, sendo comum $\dot{Q}_c = 1,2 \dot{Q}_e$.

As unidades de condensação são geralmente equipadas com condensadores adequados para a maior parte das aplicações. Estes condensadores são raramente, ou mesmo nunca, demasiadamente pequenos no que diz respeito à capacidade de condensação. Além disso, a sua capacidade de armazenamento de líquido é normalmente de tamanho suficiente para recolher a carga de refrigerante, quando ela é bombeada do evaporador para o condensador para ser armazenada.

6.2 CONDENSADORES RESFRIADOS A AR:

Condensadores resfriados a ar (fig. 67) empregam o ar como meio de resfriamento, para absorver calor do refrigerante de forma que possa mudar o seu estado para líquido.

O tamanho requerido e a configuração de um condensador são baseados na temperatura saturada de condensação da aplicação. O engenheiro que projeta o condensador considera as pressões operacionais, quedas de pressão do fluido, limitações de espaço físico, características ambientais da localização do condensador, custo de fabricação. Além de procurar trabalhar com temperaturas de condensação baixas visando aumentar a eficiência do sistema, o projeto final do condensador deve resultar em uma unidade que é um equilíbrio entre a praticidade e a economia.

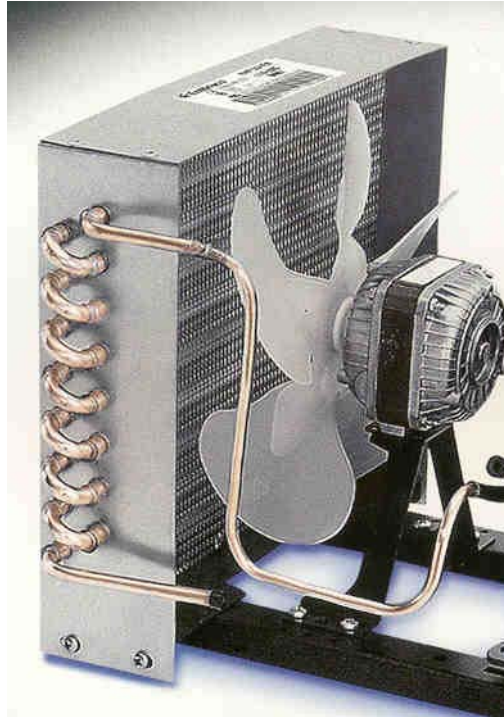
Condensadores resfriados a ar são disponíveis em uma variedade de configurações e capacidades que variam de 3,5 kW a 351,7 kW. Devido o calor específico do ar ser relativamente pequeno, é necessário uma grande quantidade de ar por unidade de transferência de calor. Esta característica restringe o tamanho de condensadores resfriados a ar, em recinto fechado ou localizados ao ar livre para capacidades menores.

A circulação de ar pode ser através de transmissão natural ou forçada. Alguns condensadores resfriados a ar maiores possuem configuração com mais de um circuito de refrigerante em separado. Estes projetos podem ser usados para atender sistemas (em cascata) que usam os mesmos ou diferentes refrigerantes.

Onde a circulação de ar é por convecção natural, a quantidade de ar circulado sobre o condensador é baixa e é necessária uma superfície de condensação relativamente grande. Por causa de sua capacidade limitada, os condensadores de convecção natural são usados somente em aplicações pequenas, principalmente congeladores e refrigeradores domésticos e geralmente são de superfície de placa ou de tubulação com aletas.

Condensadores com ventilação forçada de ar podem ser divididos em dois grupos de acordo com a localização do condensador: condensador remoto do compressor ou como parte de uma unidade condensadora.

FIGURA 67 - CONDENSADOR RESFRIADO A AR



As serpentinas são comumente construídas de cobre, alumínio, ou tubos de aço que variam de 6 a 20 mm de diâmetro. O cobre é fácil de usar e fabricar e não requer nenhuma proteção contra corrosão. O alumínio requer métodos exatos de fabricação e proteção especial se articulações de alumínio para cobre são feitas. Tubos de aço requerem proteção contra o tempo.

As aletas melhoram a transferência de calor do lado do ar. A maioria das aletas é feita de alumínio, mas o cobre e o aço também são usados. Os espaçamentos mais comuns entre aletas variam de 8 a 18 aletas por polegada.

Para um condensador resfriado a ar há uma relação definida entre o tamanho (área de face) do condensador e a quantidade de ar circulado uma vez que a velocidade do ar através do condensador é crítica dentro de certos limites. O bom projeto prescreve a mínima velocidade de ar que produzirá fluxo turbulento e um alto coeficiente de transmissão. Normalmente, as velocidades de ar sobre condensadores resfriados a ar são entre 2,5 e 5 m/s. A velocidade do ar que passa através de um condensador resfriado é dada por:

$$v_{ar} = \frac{\dot{Q}_{ar}}{A_f} \quad (53)$$

onde,

v_{ar} velocidade do ar, m/s

$\dot{Q}_{ar}$ vazão de ar, m³/s

A_f área de face, m²

Para condensadores resfriados a ar a vazão volumétrica de ar requerida pode ser determinada através da equação (48):

onde,

$\dot{V}$	vazão volumétrica de ar, m ³ /h
$\dot{Q}_c$	calor rejeitado no condensador calor, kJ/h
ρ	densidade do ar, 1,137 kg/m ³
c_p	calor específico do ar, 1,005 kJ/kg°C
t_e	temperatura do ar entrando no condensador, °C
t_s	temperatura do saindo do condensador, °C

6.2.1 Controle da pressão de condensação

O controle da pressão de condensação é uma necessidade real em instalações que funcionam 24 horas por dia, em regiões onde o ar ou a água que alimentam o condensador pode atingir temperaturas baixas, provocando baixas pressões de condensação, chegando-se ao ponto em que deixa de existir uma pressão suficiente exercida no líquido condensado para que a válvula de expansão funcione corretamente. Em sistemas de ar condicionado pode ocorrer problema de congelamento do evaporador e excesso de massa deslocada pelo compressor, prejudicando a sua placa de válvula.

Para controlar estes fatores, devem-se usar alguns meios para reduzir a capacidade de condensação para fazer corresponder à redução de capacidade total do sistema à redução da temperatura exterior e da carga do sistema.

Para condensadores resfriados a ar utilizam-se os seguintes métodos:

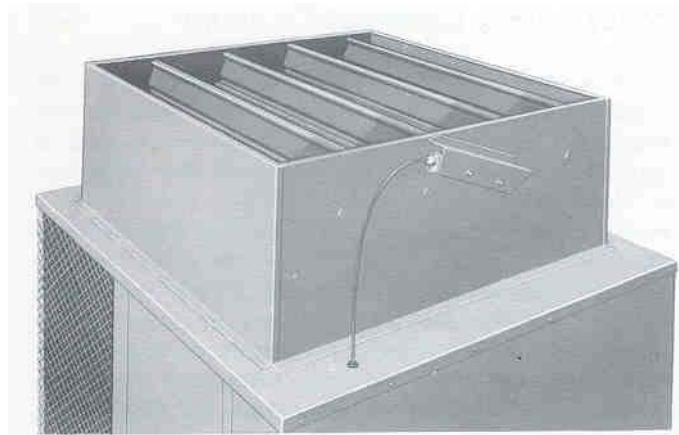
- controle por operador de pressão (registro)
- controle por alagamento
- controle cíclico do ventilador.

Cada um destes métodos de controle produz uma capacidade variável do condensador sob condições variáveis de operação. Assim, a pressão de condensação não é uma constante, mas é, contudo, controlada dentro de limites toleráveis.

O controle por operador de pressão de várias lâminas mostrado na (fig. 68) está montado por cima da descarga do ventilador do condensador. O operador de pressão é comandado por um dispositivo dotado de um êmbolo movido pela pressão de condensação.

Um aumento na pressão de condensação faz com que o motor mova as lâminas do operador de pressão para a posição de abertura, permitindo que passe um volume maior de ar pelas superfícies de condensação. Uma diminuição na pressão de condensação provoca o efeito contrário. As lâminas são comandadas para a posição fechada, restringindo o fluxo de ar.

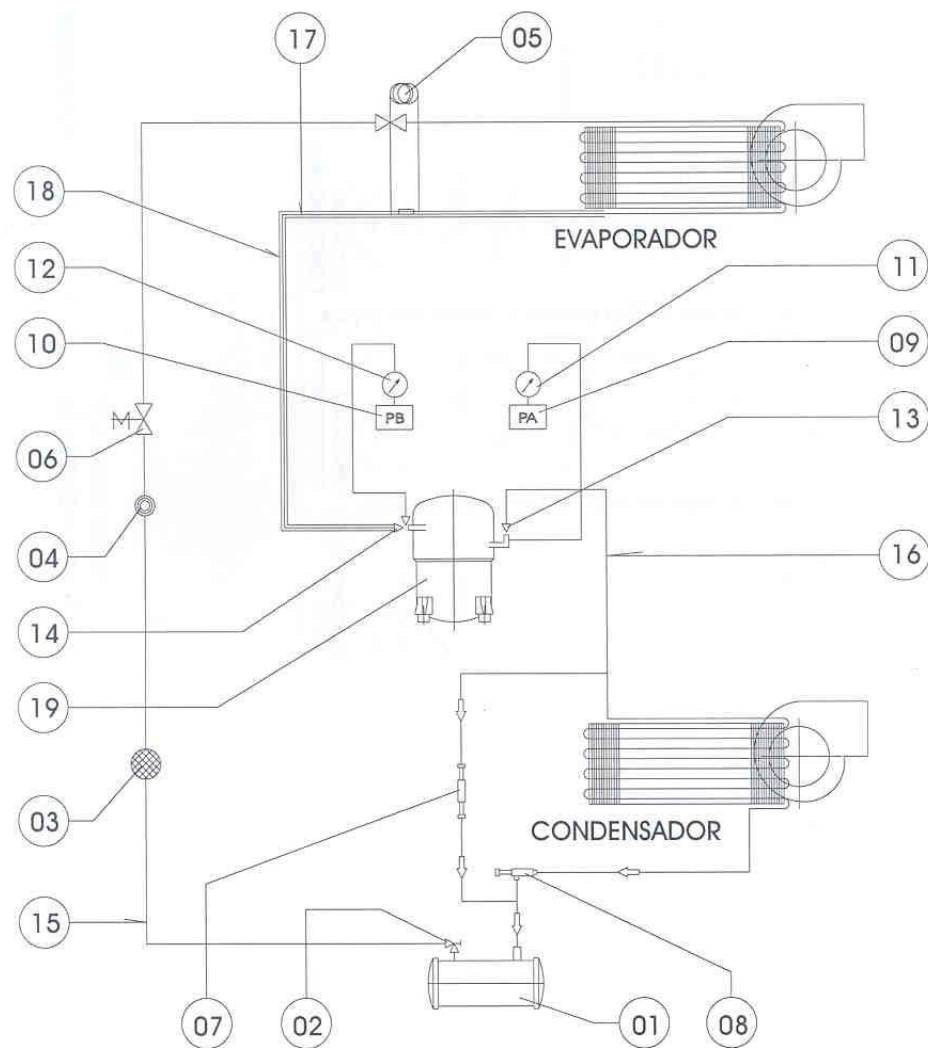
FIGURA 68 - CONTROLE POR OPERADOR DE PRESSÃO



O controle por alagamento ilustrado na (fig. 69) para um condensador resfriado a ar é baseado no controle da quantidade de refrigerante no condensador, inundando-o mais ou menos. Com isto, pode-se diminuir ou aumentar a área interna de transmissão do condensador, variando desta forma a temperatura de condensação. O nível de refrigerante é controlado pela válvula reguladora de acordo com a mínima pressão de condensação ajustada, a pressurização do tanque de líquido é garantida pela válvula diferencial. Este sistema tem ótima sensibilidade, mantendo de forma contínua a pressão de condensação desejada, não requer manutenção, e compensa naturalmente a eventual incrustação de pó na face externa da serpentina. A instalação é simples e interna, não requer ligações elétricas, ou mecanismos que alterem as dimensões do equipamento.

A (fig. 69) também representa o fluxograma de refrigeração de um self aonde: 1 - tanque de líquido para controle de condensação, 2 - válvula tanque, 3 - filtro secador, 4 - visor de líquido, 5 - válvula de expansão, 6 - válvula solenóide, 7 - válvula diferencial de pressão, 8 - válvula reguladora de pressão, 9 - pressostato de alta, 10 - pressostato de baixa, 11 - manômetro de alta, 12 - manômetro de baixa, 13 - válvula de serviço (descarga), 14 - válvula de serviço (sucção), 15 - linha de líquido, 16 - linha de descarga, 17 - linha de sucção, 18 - isolamento da linha de sucção, 19 - compressor .

FIGURA 69 - CONTROLE POR ALAGAMENTO



Com condensadores de vários ventiladores, o comando da operação dos ventiladores em seqüência fornece um controle de modulação da capacidade de condensação. Os ventiladores são comandados por termostatos sensíveis à temperatura do ar exterior.

Se ar ou outros gases não condensáveis entram no sistema de refrigeração, eles são transportados ao condensador onde reduzirão a eficiência do sistema por duas razões:

- A pressão total no condensador se elevará, o que implica uma maior potência necessária ao compressor por capacidade unitária de refrigeração. A pressão do condensador é aumentada para um valor maior que a pressão de saturação do refrigerante e esta diferença é igual à pressão parcial dos gases não condensáveis.

- Ao invés dos gases não condensáveis se difundirem ao longo do condensador, estes aderem às paredes dos tubos do condensador. Isto provoca uma redução da área disponível à condensação, o que também provoca um aumento na pressão de condensação.

Gases não condensáveis podem ser removidos do condensador por purga. A operação de purga consiste na extração da mistura de refrigerante com gases não condensáveis do condensador, separação do refrigerante e então descarga dos gases não condensáveis. Sistemas que operam com amônia normalmente estão equipados com purgadores.

6.3 EXEMPLOS ILUSTRATIVOS

EXEMPLO 6.3.1: Estimar a vazão volumétrica de água de condensação requerida para um condensador que opera com R-22, operando a uma temperatura de condensação de 40°C , uma temperatura de evaporação de 5°C e 5°C de sub-resfriamento e superaquecimento. A água entra no condensador a 30°C e sai a 35°C . A carga de refrigeração é de 100 TR.

EXEMPLO 6.3.2: Um condensador resfriado a ar precisa rejeitar 70 kW de energia do refrigerante ao ar. O condensador tem uma área de troca de calor do lado do ar de 210 m^2 e um valor de U baseado nesta área de $0,037\text{ kW/m}^2\text{C}$. A vazão de ar é $6,6\text{ m}^3/\text{s}$ e o ar tem densidade igual a $1,15\text{ kg/m}^3$. Se a temperatura de condensação está limitada a 55°C , qual a máxima temperatura de entrada do ar?

EXEMPLO 6.3.3: Especificar a área de um condensador de um sistema de refrigeração, com capacidade de 80 kW, a ser utilizado em ar condicionado. O refrigerante é do tipo R-22, a temperatura de evaporação é de 5°C e a de condensação é efetuada a 45°C , nas condições de projeto. A água proveniente da torre de resfriamento entra no condensador a 30°C e sai a 35°C .

Um condensador de dois passes com 42 tubos, tubos estes arranjados como mostra a (fig. 70), será usado e para que se determine a área de troca necessária basta especificar o comprimento dos tubos. Estes tubos são construídos de cobre com diâmetro interno de 14 mm e externo de 16 mm.

FIGURA 70 - ARRANJO DOS TUBOS DO CONDENSADOR

