

3 SISTEMAS DE COMPRESSÃO A VAPOR DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS

Os sistemas de múltiplos estágios visam atender instalações na área de refrigeração como supermercados, com várias câmaras frias que necessitam mais de um evaporador ou instalações de baixas temperaturas como laticínios, $t_e = -35^\circ\text{C}$, indústrias químicas, $t_e = -100^\circ\text{C}$ ou liquefação de gás natural, $t_e = -161^\circ\text{C}$.

Os sistemas de múltiplos estágios também podem ser usados em bombas de calor, onde o condensador opera a temperatura muito elevada, $t_c = 70^\circ\text{C}$.

3.1 INSTALAÇÃO COM VÁRIOS EVAPORADORES

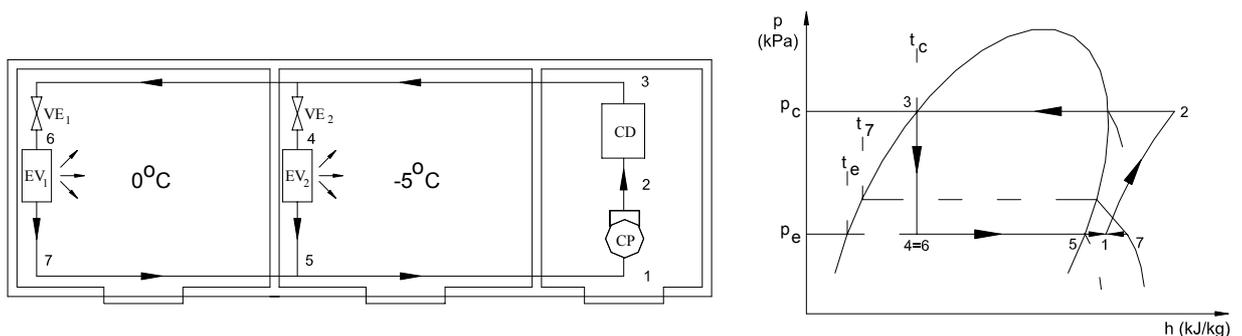
3.1.1 Câmaras frigoríficas com temperaturas próximas

As temperaturas das diversas câmaras são muito próximas, como por exemplo, duas câmaras de 0°C e -5°C .

A melhor solução seria uma instalação completa e independente para cada câmara, porém a mais cara. Os produtos de uma câmara avariada podem ser remanejados para outra câmara.

Outra alternativa seria utilizar o sistema mostrado na (fig. 27), onde as diferenças de temperatura são obtidas mediante o cálculo da área de cada evaporador. A menor das temperaturas das câmaras é que determina a pressão de sucção da instalação.

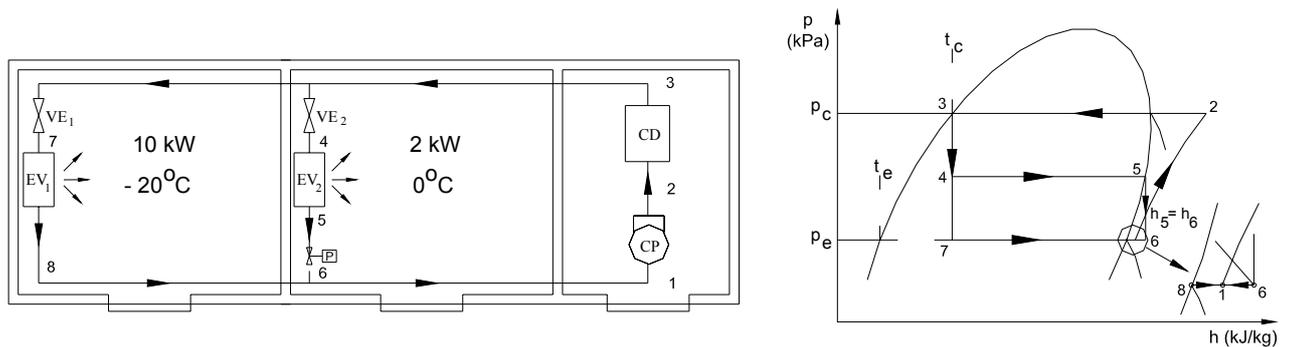
FIGURA 27 - CÂMARAS FRIGORÍFICAS COM TEMPERATURAS PRÓXIMAS



3.1.2 Câmaras frigoríficas com temperaturas bastante diferentes

O sistema mostrado na (fig. 28) é indicado para cargas térmicas bastante diferentes e utiliza um compressor para todo o sistema e uma válvula reguladora de pressão, VRP para a câmara de maior temperatura, que funciona segundo uma transformação irreversível, introduzindo perdas inevitáveis ao sistema.

FIGURA 28 - CÂMARAS FRIGORÍFICAS COM 1CP E 1VRP



Os sistemas mostrados nas (figs. 29-30) utilizam dois compressores em paralelo e dois compressores em série, indicados quando as cargas térmicas são próximas.

FIGURA 29 - CÂMARAS FRIGORÍFICAS COM COMPRESSORES EM PARALELO

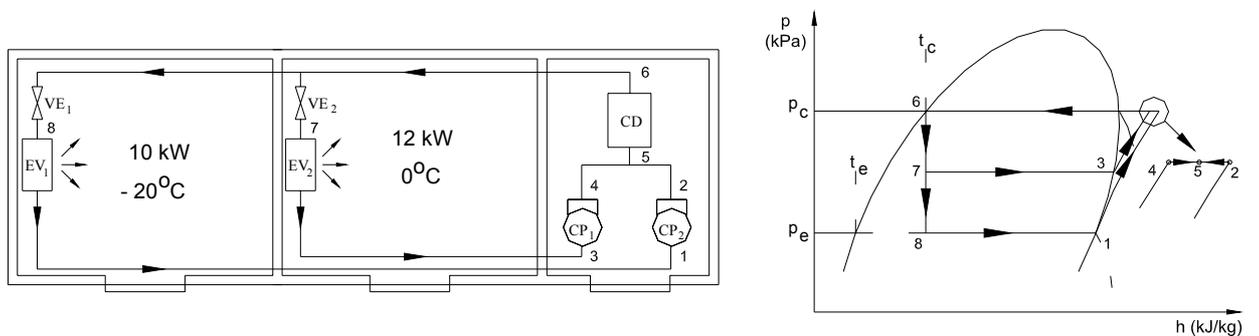
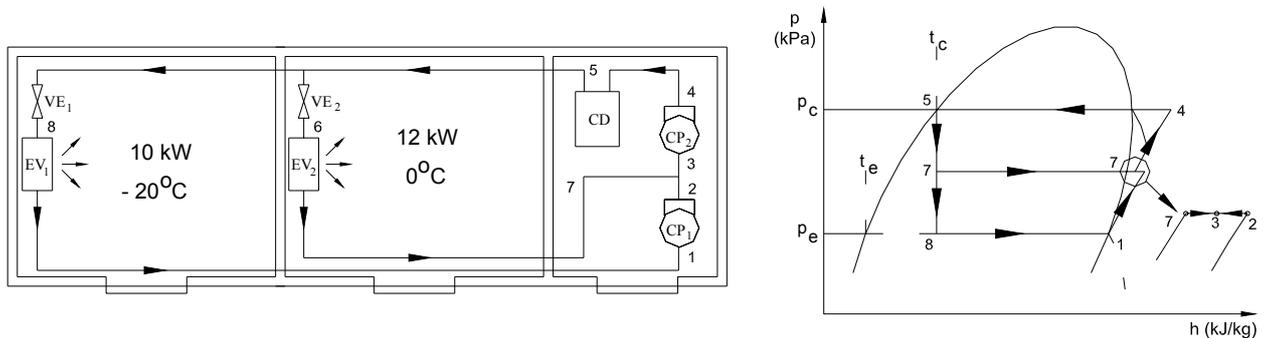


FIGURA 30 - CÂMARAS FRIGORÍFICAS COM COMPRESSORES EM SÉRIE



3.2 INSTALAÇÃO PARA OBTENÇÃO DE BAIXAS TEMPERATURAS

Quando a diferença entre as temperaturas da fonte quente e da fonte fria do ciclo de refrigeração é muito elevada, a relação de compressão, $R=p_c/p_e$ a ser vencida pelo compressor atinge valores altos, acarretando um abaixamento no rendimento volumétrico, η e uma elevação da temperatura de descarga do compressor, provocando uma carbonização do óleo, aumentando o perigo de explosão e tornando mais fácil o ataque das válvulas (corrosão), além disso, a relação de compressão alta requer um compressor de grandes dimensões, onde torna-se aconselhável o uso da compressão por estágios.

Acrescenta-se ainda que o fato de que a compressão por estágios permite, por meio da refrigeração intermediária, a redução do trabalho de compressão e, portanto, o aumento de rendimento frigorífico da instalação.

Assim, quando $R > 9$, a compressão deve ser feita em estágios e a partir das condições ambientes, e dependendo do fluido frigorífico utilizado, como dados práticos em função da temperatura de evaporação os números de estágios recomendados são:

- $t_e > -35^\circ\text{C}$, 1 estágio de compressão;
- $-70^\circ\text{C} < t_e < -35^\circ\text{C}$, 2 estágios de compressão;
- $t_e < -70^\circ\text{C}$, 3 ou mais estágios de compressão.

3.2.1 Ciclo de expansão fracionada

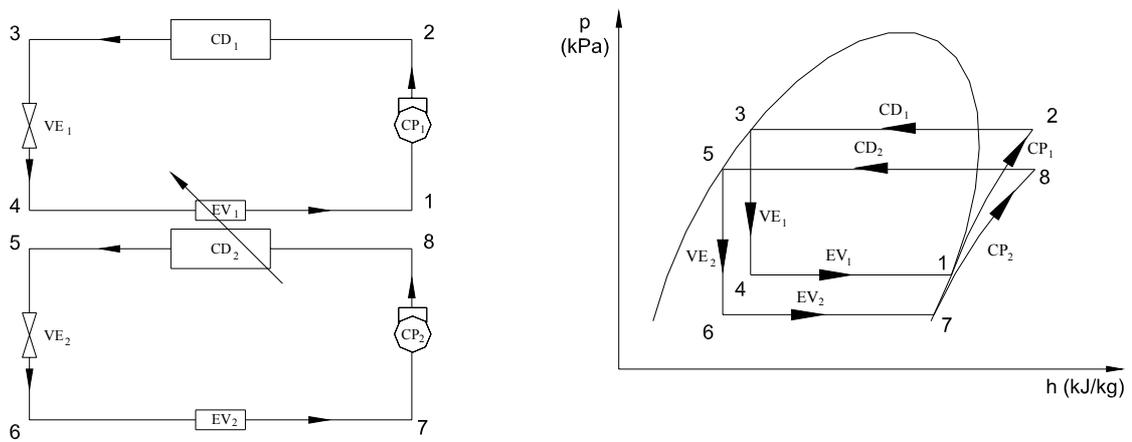
Na expansão fracionada o líquido expande-se até uma pressão intermediária, do separador de líquido, onde as fases líquidas e vapor separam-se e a seguir o líquido continua a expandir-se até à pressão mais baixa para o vapor ser comprimido em estágios, a partir desta pressão, como ilustra a (fig. 31).

Utilizando o separador de líquido da (fig. 31), é possível realizar-se uma economia na potência requerida de um sistema de refrigeração se o vapor que é gerado no processo de expansão entre o condensador e o evaporador é removido e recomprimido antes de completar a sua expansão.

de refrigeração de um segundo fluido, que se caracteriza por ter elevadas pressões de saturação mesmo a baixas temperaturas.

Nesses sistemas, o problema da migração de óleo de um compressor para outro, observado em sistemas de duplo estágio de compressão, é eliminado, uma vez que os ciclos são desacoplados.

FIGURA 33 - INSTALAÇÃO EM CASCATA



Um exemplo de sistema em cascata seria aquele que operasse com R-12 ou R-22 no circuito de alta pressão e R-13 no de baixa pressão. Na (tab. 1) são apresentadas algumas propriedades termodinâmicas do R-12 e do R-13. Dessa tabela pode se concluir que, em um sistema que operasse a uma temperatura de evaporação de -70°C , a utilização do R-12 implicaria numa pressão de evaporação inferior à atmosférica. Por outro lado, a utilização de um sistema em cascata, com R-13 no circuito de baixa pressão, permitiria uma operação à pressão de evaporação superior à atmosférica.

Da (tab. 1) pode se concluir que a capacidade volumétrica do compressor de R-13, operando a -70°C , deveria ser 1/14 daquela do compressor de R-12. Por outro lado, sob uma condição de parada, quando o sistema atingisse uma temperatura próxima à do ambiente (25°C), a pressão no circuito de R-13 atingiria valores da ordem de 3.500 a 4.000 kPa, elevados para as espessuras de paredes de tubos e vasos geralmente adotados, daí a necessidade do sistema de baixa temperatura ser dotado de um tanque de expansão.

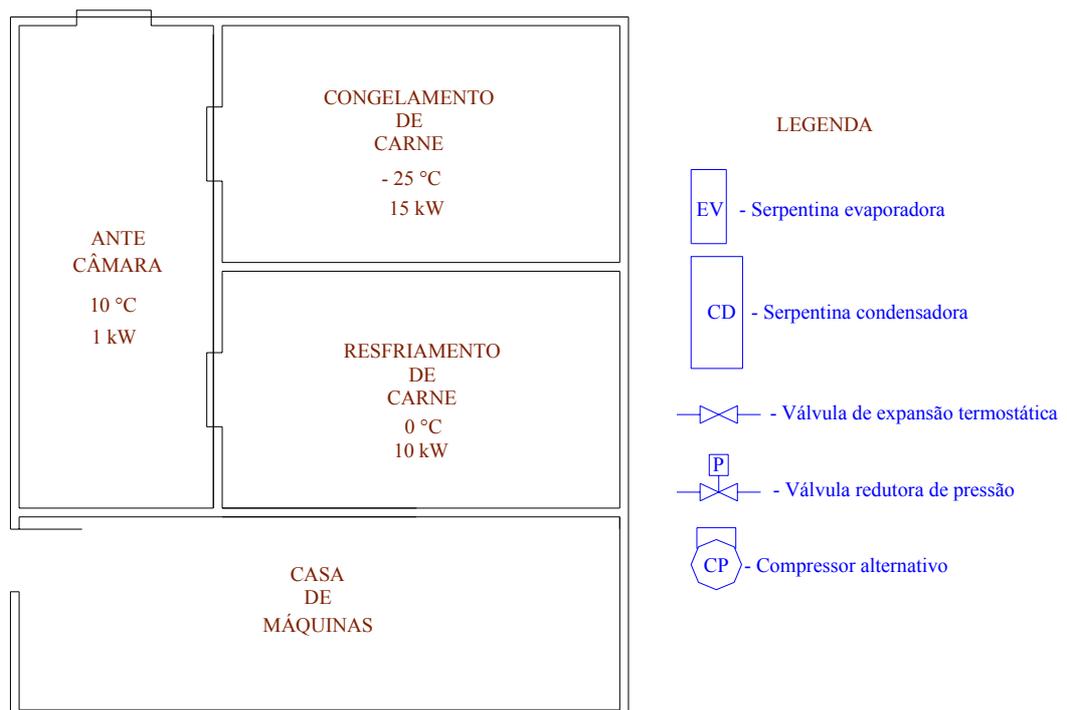
TABELA 1 - PRESSÃO DE SATURAÇÃO E VOLUME ESPECÍFICO DO VAPOR SATURADO PARA R-12 E R-13

Temp. (°C)	R-12		R-13	
	Pressão de saturação (kPa)	Volume específico do vapor (m ³ /kg)	Pressão de saturação (kPa)	Volume específico do vapor (m ³ /kg)
-70	12,42	1,146	180,9	0,08488
25	651,6	0,02686	3560	0,002915

3.3 EXEMPLOS ILUSTRATIVOS

EXEMPLO 3.3.1: Considere a instalação frigorífica da (fig. 34):

FIGURA 34 - LAY-OUT DA INSTALAÇÃO



Utilizando os sistemas 2 compressores em paralelo, 2 compressores em série e 1 compressor e 1 VRP. Calcular o COP destes sistemas, conhecendo-se:

- $\Delta T = a 6^{\circ}\text{C}$;
- temperatura de condensação = 35°C ;
- fluido utilizado: R-22;
- que não há superaquecimento;

Desenhe os ciclos e represente-os no diagrama p-h.

EXEMPLO 3.3.2: Uma instalação frigorífica de R-22 (fig. 31) opera entre temperaturas de evaporação e condensação iguais, respectivamente, a -30°C e 35°C . A pressão intermediária corresponde a uma temperatura de saturação de 0°C . Se a capacidade frigorífica da instalação é de 150 kW. Admitindo que tanto o refrigerante líquido que deixa o condensador quanto o vapor que deixa o evaporador estejam ambos saturados e que os processos de compressão sejam isoentrópicos, determine:

- a) a potência de compressão;
- b) a vazão volumétrica na aspiração do compressor;
- c) a potência total de compressão;
- d) a vazão volumétrica na aspiração do compressor principal.

EXEMPLO 3.3.3: Uma instalação frigorífica de amônia, R-717 (fig. 32) opera entre temperaturas de evaporação e condensação iguais, respectivamente, a -24°C e 30°C . A pressão intermediária corresponde à pressão de 430 kPa. Se a capacidade frigorífica da instalação é de 210 kW e o sub-resfriamento no resfriador de líquido de 10°C . Qual deve ser a potência total de compressão?