

2. Ciclos frigoríficos

Profa. Alessandra Lopes de Oliveira

2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

□ Conceitos básicos:

- Refrigeração: remoção de calor;
- Carga Térmica: calor que deve ser removido para que se atinja a T desejada;
- Agentes de refrigeração (refrigerantes): substância que absorve calor;
 - Esfriamento sensível: o calor absorvido eleva a temperatura do refrigerante;
 - Esfriamento latente: o calor absorvido muda o estado físico do refrigerante;

2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

Fig. 9-2 Heat flows from the warmer space to the cold water. The water temperature rises as the space temperature decreases. In this apparatus, the refrigeration process will not be continuous.

Fig. 9-4 Heat flows from warm space to cold ice. Temperature of space decreases as ice melts. Temperature of ice remains at 32°F. Heat absorbed by ice leaves space in water going out the drain.

2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

Refrigerantes Líquidos

- Base do sistema de refrigeração
- Qualquer substância que evapore a T baixa;
- Refrigerante ideal CCl_2F_2 : diclorofluorometano (R-12) (CFC); proibido devido ao alto ÔDP (Potencial de Destruição de Ozônio)
- Mais utilizados ultimamente:
 - R-134a (HFC);
 - R-22 (HCFC);
 - R-404 (Mistura azeotrópica);
 - R-707 (Amônia) – refrigerante da classe dos inorgânicos

2.1.A refrigeração e o sistema de compressão

- A vaporização do refrigerante absorve calor da câmara; e qualquer recipiente onde o refrigerante é vaporizado denomina-se evaporador

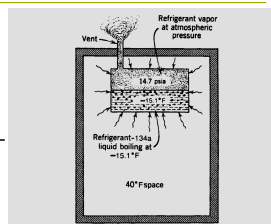


Fig. 9-7 The Refrigerant-134a liquid vaporizes as it takes in heat from the 40° F space. The heat taken in by the refrigerant leaves the space in the vapor escaping through the vent.

2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

- A T de vaporização pode ser regulada pelo controle da P:

- $\uparrow P \Rightarrow \uparrow T$

- O ajuste de uma válvula regula o fluxo de vapor controlando a P_v e a T desejada.

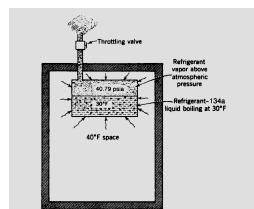


Fig. 9-8 The boiling temperature of the liquid refrigerant in the evaporator is controlled by controlling the pressure of the vapor over the liquid with the throttling valve in the vent.

2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

- Para reduzir a P no evaporador utiliza-se uma bomba de deslocamento positivo (bomba de vapor – compressor)

■ $\downarrow P \Rightarrow \downarrow T$

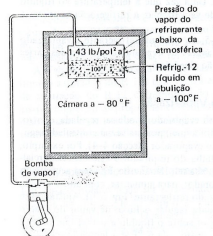


Fig. 6-7 Pressão do refrigerante no evaporador reduzida abaixo da atmosférica pela ação de uma bomba de vapor.

2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

- Conservação do refrigerante líquido no evaporador tem que ser contínuo:
 - Líquido constante \Rightarrow evaporação constante

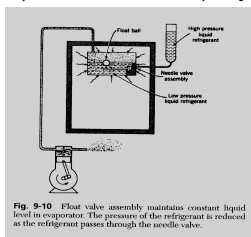
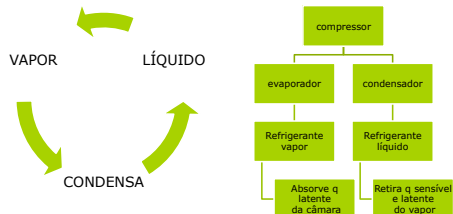


Fig. 9-10 Float valve assembly maintains constant liquid level in evaporator. The pressure of the refrigerant is reduced as the refrigerant passes through the needle valve.

- Se diminui o nível de refrigerante, o controle de refrigerante (válvula de expansão) mantém o nível desejado.

2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

- A recuperação do refrigerante:



2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

- Agentes de condensação: retira o calor latente do vapor no condensador
 - Água: proveniente de canalização urbana ou torres de resfriamento;
 - Ar: proveniente do ambiente externo
 - (T ambiente)

2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

- Influência do compressor na recuperação do refrigerante:
 - A T do agente de condensação tem que ser menor que a T do vapor refrigerante;
 - **Problema:** a T do vapor saturado que sai do evaporador é menor que a T do agente de condensação ⇒ o calor não fluirá do vapor refrigerante para o agente de condensação;
 - **Solução:** aumentar a T de saturação do vapor refrigerante ⇒ **Compressor**

2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

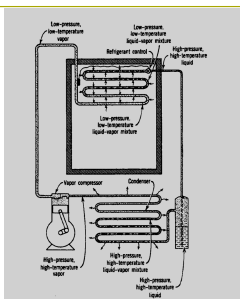


Fig. 9-11 Collecting and condensing the refrigerant vapor. Refrigerant absorbs heat in the evaporator and gives off heat in the condenser.

2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

□ Sistema típico de vapor-compressão

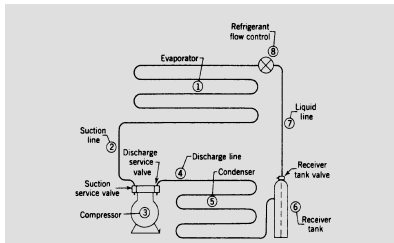


Fig. 9-5 Flow diagram of a simple mechanical refrigeration system showing the principal parts.

2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

□ O ciclo frigorífico é dividido em duas partes:

- Região de baixa pressão (p de evaporação, de admissão ou contra pressão):
 - Válvula de expansão;
 - Evaporador;
 - Linha de admissão do compressor.
- Região de alta pressão (p de condensação, de exaustão ou de recalque):
 - Compressor;
 - Linha de exaustão do compressor;
 - Condensador;
 - Tanque de líquido refrigerante.

2.2. Ciclo Frigorífico

□ O Ciclo frigorífico é constituído de 4 processos termodinâmicos fundamentais:

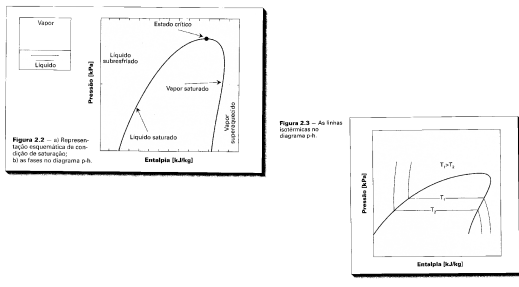
- Expansão;
- Evaporação;
- Compressão;
- Condensação.

2.2. Ciclo Frigorífico

- O Diagrama de Pressão × Entalpia
 - É a ferramenta mais utilizada para correlacionar propriedades termodinâmicas dos refrigerantes;
 - É constituída por:
 - Linhas isotérmicas (T constante)
 - Linhas isoentrópicas (S constante)
 - Linhas isocóricas (V constante)
 - A Pressão (P): caracteriza as condições operacionais de um circuito frigorífico;
 - A entalpia (H) é a propriedade usada para os cálculos termodinâmicos (tratada como conteúdo de calor);

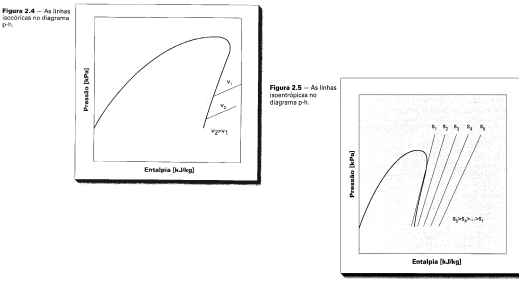
2.2. Ciclo Frigorífico

- O Diagrama de Pressão × Entalpia



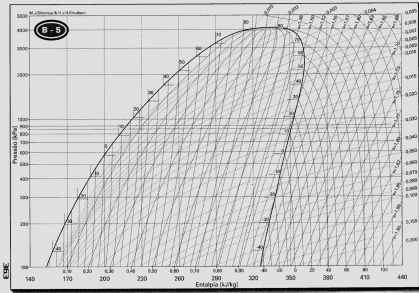
2.2. Ciclo Frigorífico

- O Diagrama de Pressão × Entalpia



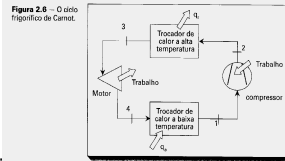
2.2. Ciclo Frigorífico

- O Diagrama de Pressão x Entalpia



2.2. Ciclo Frigorífico

- O Ciclo de Carnot:
 - Compressor;
 - Dois trocadores de calor;
 - Motor térmico (Turbina)
- 1-2 Compressão isentrópica;
- 2-3 Rejeição de calor isotérmica;
- 3-4 Expansão isentrópica;
- 4-1 Remoção isotérmica de calor ambiente



2.2. Ciclo Frigorífico

- O Ciclo de Carnot

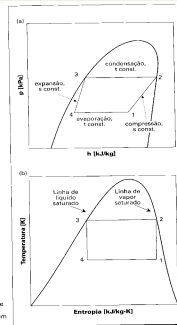


Figura 2.8 - O ciclo de Carnot, tal em (a) em um diagrama p-h, (b) em um diagrama T-s.

2.2. Ciclo Frigorífico

- O Ciclo de Carnot é um ciclo termodinamicamente ideal, a termodinâmica aplicada visa reproduzir um ciclo de Carnot para que se obtenha máxima eficiência de processo.
- Em comum com o Ciclo de Carnot, o Ciclo Frigorífico tem:
 - A compressão que é isoentrópica;
 - A troca de calor que ocorre nas fontes frias e quentes (evaporador e condensador) que é considerada isotérmica (transição de fase do líquido-vapor refrigerante);

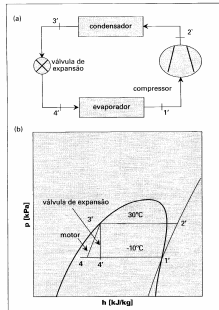
2.2. Ciclo Frigorífico

- Motor térmico × Dispositivo de expansão
 - Um motor térmico reversível não é usado em refrigeração, não há um motor que execute uma expansão de uma mistura líquido-vapor;
 - A expansão em um ciclo frigorífico é causada pelo estrangulamento do refrigerante através de uma válvula ou dispositivo de expansão, admite-se que o processo de expansão é adiabático.

2.2. Ciclo Frigorífico

- Representação do ciclo frigorífico em um diagrama de $P \times H$

Figura 2.23 – Ciclo onde o motor foi substituído pelo dispositivo de expansão. (a) instalação; (b) o diagrama p-h do ciclo, com compressão seca.



2.2. Ciclo Frigorífico

□ Efeito Refrigerante:

- Calor que cada unidade de massa de refrigerante absorve da câmara de refrigeração
- Exemplo:
 - 1 lb de gelo se funde a 32°F ⇒ absorve do ambiente 144 BTU/lb (Sistema inglês)
 - 1 kg de gelo (0°C) ⇒ 335 kJ/kg (SI)
 - O efeito refrigerante de 1kg de gelo é 335 kJ e de 1lb é de 144 BTU;

2.2. Ciclo Frigorífico

□ No ciclo frigorífico o refrigerante líquido vaporiza, absorve calor do ambiente (calor latente de vaporização):

- Sistema ideal:
 - T_v = Temperatura de evaporação do líquido refrigerante: $q = q$ latente de vaporização.
- Sistema real:
 - T do líquido refrigerante $> T_v$
 - A T do líquido refrigerante tem que ser reduzida à T_v assim:
Efeito refrigerante (ER) $< q$ latente de vaporização
ER = q latente de vaporização - q do líquido no controle do refrigerante

2.2. Ciclo Frigorífico

□ Capacidade do sistema:

- É a taxa à qual o sistema removerá calor, é uma taxa de transmissão de energia, expressa em potência.
- A capacidade depende:
 - Massa de refrigerante circulada por tempo;
 - Ação do refrigerante (Efeito refrigerante) por unidade de massa.

2.2. Ciclo Frigorífico

□ Capacidade do sistema:

$$Q_e = (m) \times q_e$$

m = vazão mássica por tempo;

q_e = efeito refrigerante.

2.2. Ciclo Frigorífico

□ Exemplo:

- Um sistema de refrigeração opera em condições tais que a T de evaporação é -10°C , enquanto que a T do líquido que se aproxima do dispositivo de expansão é 30°C . Se o R-502 é circulado através do sistema a uma taxa de $1,4\text{kg/s}$, determine:
 - A capacidade de refrigeração do sistema em kJ/s (kW);
 - A capacidade de refrigeração do sistema em TR

2.2. Ciclo Frigorífico

□ Resolução:

- $q_e = q_{\text{vap}} - q_{\text{liq}} = 342,3 \text{ kJ/kg} - 235,6 \text{ kJ/kg}$
- $q_e = 106,6 \text{ kJ/kg}$
- $Q_e = (m) \times q_e = 1,4 \text{ kg/s} \times 106,6 \text{ kJ/kg}$
- $Q_e = 149,24 \text{ kW}$

2.2. Ciclo Frigorífico

□ Resolução:

- 1 TR = calor absorvido na fusão de 1 ton de gelo
 - 1lb de gelo absorve 144 BTU
 - 1TR = 2000lb × 144 BTU = 288.000 BTU/24h
 - 1TR = 12.000 BTU/h ou 200 BTU/min
- No sistema internacional (SI)
 - 1kg de gelo absorve 335 kJ
 - 1TR = 335.000 kJ/24h
 - 1TR = 12.407 kJ/h ou 3,47 kW
- $Q_e = 149,24 \text{ kW}$ corresponde a 43TR

2.3. Ciclo Frigorífico Real

□ No funcionamento de um ciclo frigorífico deve-se considerar:

- Queda de P nas linhas através do evaporador e condensador;
- Sub-resfriamento do líquido;
- Super-aquecimento do vapor;
- Variação na entropia do compressor.

2.3. Ciclo Frigorífico Real

□ Super-aquecimento do vapor de admissão

- O refrigerante sai do evaporador e continua a absorver calor se tornando super-aquecido antes do compressor
 - Para uma mesma P a T aumenta;
 - O calor na compressão aumenta ⇒ aumenta a quantidade de calor que deve ser rejeitado na condensação. Parte do calor a ser rejeitado é sensível;
 - O volume do vapor aumenta.

2.3. Ciclo Frigorífico Real

□ Super-aquecimento do vapor de admissão

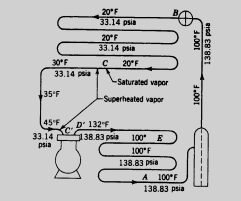


Fig. 11-1 Flow diagram of superheated cycle: Liquid completely vaporized at point C—saturated vapor continues to absorb heat while flowing from C to D where vapor reaches compressor in superheated condition. Notice the high discharge temperature. (Refrigerant-134a)

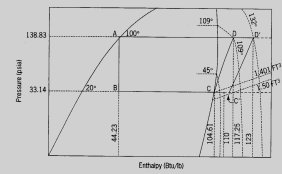


Fig. 11-2 Pressure-enthalpy diagram comparing simple saturated cycle with the superheated cycle. (Refrigerant-134a)

2.3. Ciclo Frigorífico Real

□ Superaquecimento sem e com resfriamento útil

- O efeito do superaquecimento do vapor de admissão sobre a capacidade do sistema, depende de onde ocorre o superaquecimento:
 - Se o calor for absorvido dentro do espaço refrigerado, produz **resfriamento útil**;
 - O calor absorvido pelo refrigerante fora do espaço refrigerado (linha de admissão) produz **resfriamento inútil**.

2.3. Ciclo Frigorífico Real

□ Superaquecimento sem resfriamento útil

- Não muda o efeito de refrigeração ⇒ ciclo saturado = ciclo superaquecido;
- O fluxo de massa de refrigerante requerido por unidade de capacidade será a mesma para ambos.
 - Para produzir 1TR (200 BTU/min) de capacidade, o fluxo de massa será:

$$m = \frac{Q_c}{q_c} = \frac{200 \text{ BTU/min}}{(104,61 - 44,23) \text{ BTU/lb}}$$

$$m = 3,32 \text{ lb/min}$$

2.3. Ciclo Frigorífico Real

- Superaquecimento sem resfriamento útil
 - O fluxo do volume do vapor que o compressor deve comprimir por unidade de capacidade é maior para o ciclo superaquecido:
 - Ciclo saturado: $v = 1,40 \text{ ft}^3/\text{lb}$
 $V = m \times v = 3,32 \times 1,40$
 $V = 4,65 \text{ ft}^3 / \text{min}$
 - Ciclo superaquecido: $v = 1,50 \text{ ft}^3/\text{lb}$
 $V = 4,98 \text{ ft}^3/\text{min}$

2.3.Ciclo Frigorífico Real

- Superaquecimento sem resfriamento útil
 - O coeficiente de eficiência ou de eficácia (COP) diminui:

$$\text{COP} = \frac{\text{Energia útil}}{\text{Energia que deve ser paga}} = \frac{T_r}{T_i - T_r}$$

$$\text{COP} = \frac{\text{Efeito refrigerante}}{\text{Potência que deve ser fornecida}}$$
 - Ciclo saturado: $\text{COP} = \frac{104,61 - 44,23}{104,61 - 117,25} = 4,78$
 - Ciclo superaquecido: $\text{COP} = \frac{104,61 - 44,23}{110 - 123} = 4,64$

2.3. Ciclo Frigorífico Real

- Superaquecimento com resfriamento útil
 - O efeito refrigerante é maior: $q_e = 110 - 44,23 = 65,77 \text{ BTU} / \text{lb}$
 - A taxa de fluxo de massa necessária para produzir a mesma capacidade de refrigeração será menor;
 - Se a massa é menor, a taxa de volume de vapor a ser comprimido será menor que no ciclo saturado;
 - O COP é maior: $\text{COP} = \frac{110 - 44,23}{110 - 123} = 5,06$

2.3. Ciclo Frigorífico Real

- ❑ Superaquecimento excessivo no evaporador reduz sua capacidade.
- ❑ Circuito secante:
 - Inundação mais completa do refrigerante no evaporador;
 - Uso mais eficiente da superfície do evaporador;
 - Superaquece o vapor controlado pela temperatura da câmara;
 - Há necessidade de isolamento na linha de sucção.

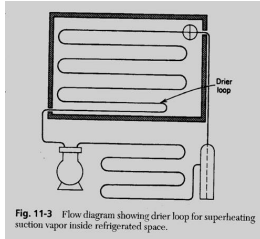


Fig. 11-3 Flow diagram showing drier loop for superheating suction vapor inside refrigerated space.

2.3. Ciclo Frigorífico Real

- ❑ Sub-resfriamento do líquido

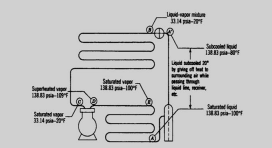


Fig. 11-5 Flow diagram illustrating subcooling of the liquid in the liquid line. (Refrigerant-134a)

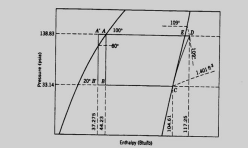


Fig. 11-4 Pressure-enthalpy diagram comparing the subcooled cycle with the simple saturated cycle. (Refrigerant-134a)

2.3. Ciclo Frigorífico Real

- ❑ Sub-resfriamento do líquido:
 - O efeito refrigerante aumenta:
 $q_c = 104,61 - 37,27 = 65,77 \text{ BTU/lb}$
 - Se q_c aumenta, diminui o fluxo de massa necessário para produzir uma mesma capacidade que o ciclo saturado;
 - O Fluxo de vapor a ser comprimido também será menor que o ciclo saturado;
 - O COP é maior para o ciclo sub-resfriado.

2.3. Ciclo Frigorífico Real

- Efeitos das perdas de pressão do fluido refrigerante resultantes do atrito
- As perdas de carga ocorrem:
 - Evaporador;
 - Condensador;
 - Tanque de líquido;
 - Válvulas de admissão e exaustão do compressor.

2.3. Ciclo Frigorífico Real

- Efeitos das perdas de pressão do fluido refrigerante resultantes do atrito

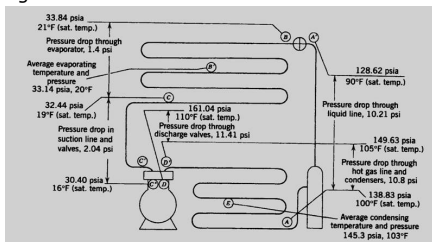


Fig. 11-10 Flow diagram illustrating the effect of pressure drop in various parts of the system. Pressure drops are exaggerated for clarity. (Refrigerant-134a)

2.3. Ciclo Frigorífico Real

- Efeitos das perdas de pressão do fluido refrigerante resultantes do atrito

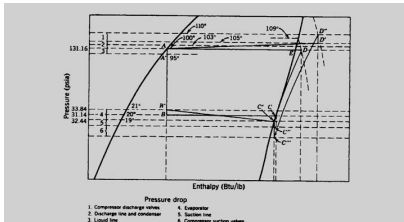


Fig. 11-11 Pressure-enthalpy diagram of refrigeration cycle illustrating the effect of pressure losses in the various parts of the system. A simple saturated cycle is drawn in for comparison. (Refrigerant-134a)

Para a próxima aula

- Resolução de exercícios;
 - Tragam tabelas e diagramas dos refrigerantes.
- Ciclos frigoríficos de duplo estágio.
