

## 2. Ciclos frigoríficos

---

Profa. Alessandra Lopes de Oliveira

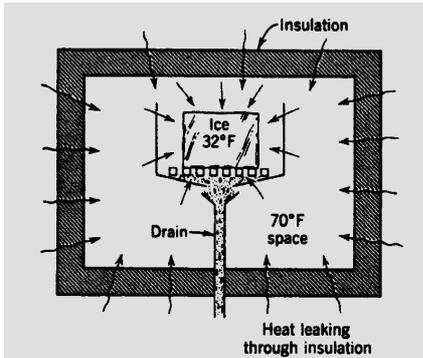
### 2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

---

#### □ 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



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 down drain.

- Calor latente de transição de fase
  - Água sólida → água líquida
  - Remoção de calor do ambiente para que ocorra a transição de fase.

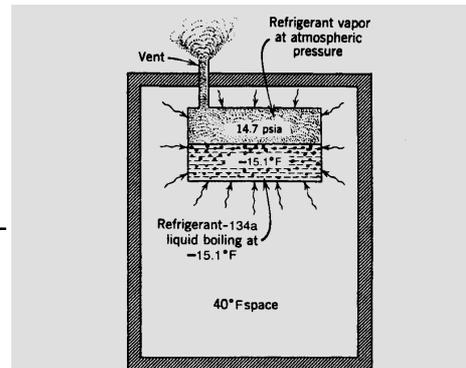
## 2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

### □ Refrigerantes líquidos

- Base do sistema de refrigeração
- Qualquer substância que evapore a T baixa;
- Refrigerante ideal  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ : diclorofluorometano (R-12) (CFC); proibido devido ao alto ODP (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

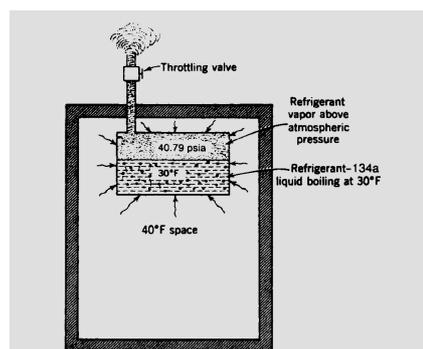


**Fig. 9-7** The Refrigerant-134a liquid vaporizes as it takes in heat from the 40°F space. The heat taken in by the refrigerant leaves the space in the vapor escaping through the vent.

## 2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

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

- $\uparrow P \Rightarrow \uparrow T$



**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)

- $\downarrow P \Rightarrow \downarrow T$

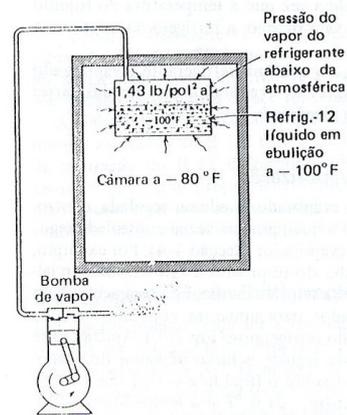
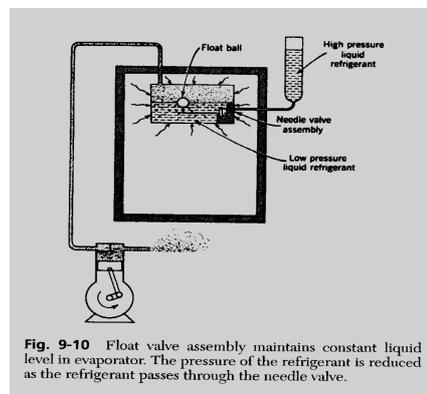


Fig. 6-7 Pressão do refrigerante no evaporador reduzida abaixo da atmosférica pela ação de uma bomba de vapor.

## 2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

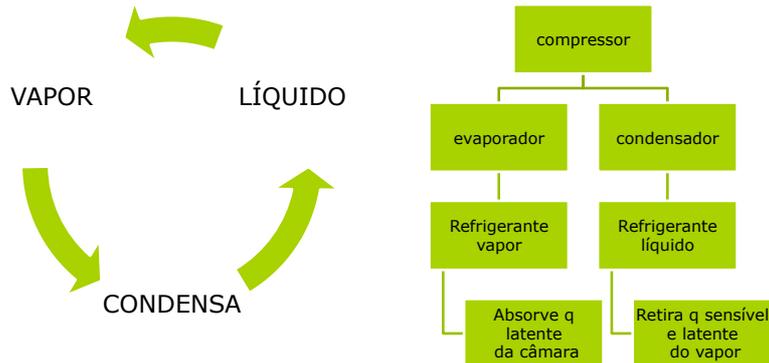
- Conservação do refrigerante líquido no evaporador tem que ser contínuo:
  - Líquido constante  $\Rightarrow$  evaporação constante



- 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

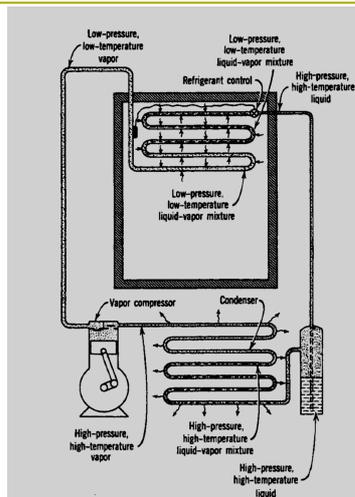
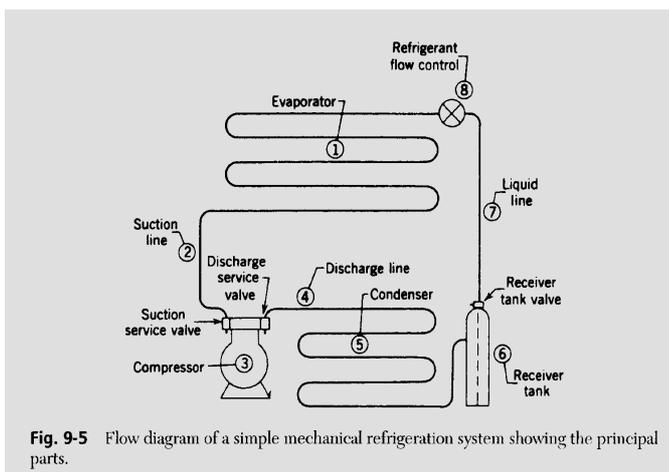


Fig. 9-11 Collecting and condensing the refrigerant vapor. Refrigerant absorbs heat in the evaporator and gives off heat in the condenser.

## 2.1. A refrigeração e o sistema de compressão

### □ Sistema típico de vapor-compressão



## 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

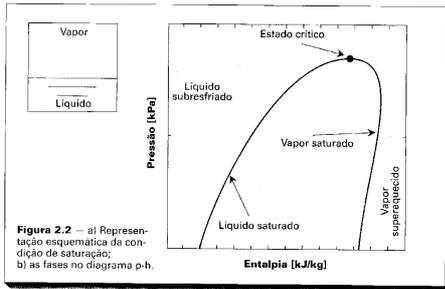
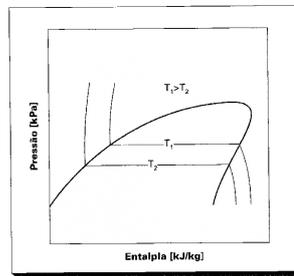


Figura 2.2 – a) Representação esquemática da condição de saturação; b) as fases no diagrama p-h.

Figura 2.3 – As linhas isotérmicas no diagrama p-h.



## 2.2. Ciclo Frigorífico

### □ O Diagrama de Pressão × Entalpia

Figura 2.4 – As linhas isocóricas no diagrama p-h.

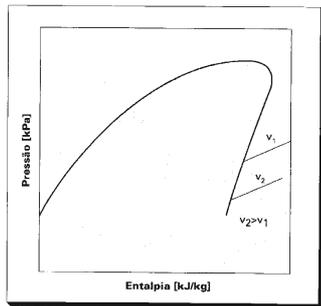
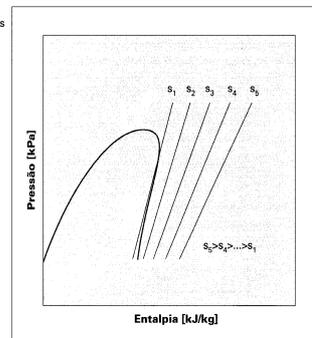
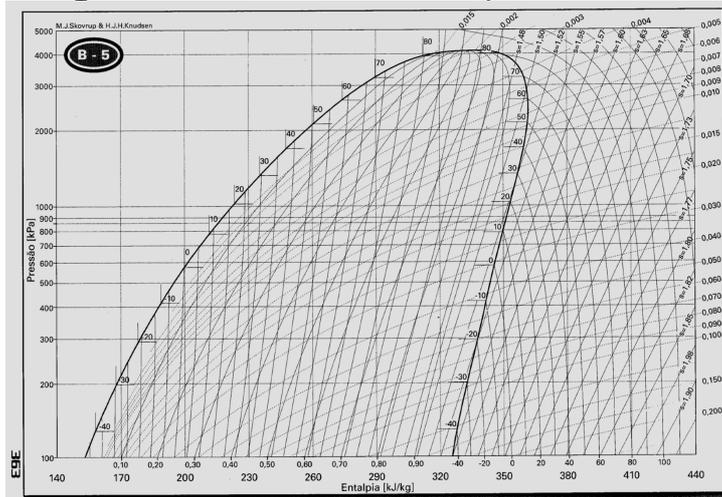


Figura 2.5 – As linhas isoentrópicas no diagrama p-h.



## 2.2. Ciclo Frigorífico

### □ O Diagrama de Pressão × Entalpia



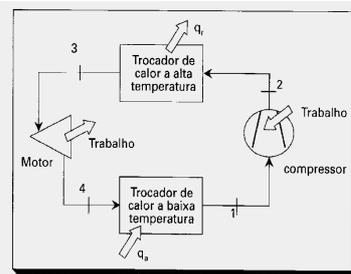
## 2.2. Ciclo Frigorífico

### □ O Ciclo de Carnot:

- Compressor;
- Dois trocadores de calor;
- Motor térmico (Turbina)

- 1-2 Compressão isoentrópica;
- 2-3 Rejeição de calor isotérmica;
- 3-4 Expansão isoentrópica;
- 4-1 Remoção isotérmica de calor ambiente

Figura 2.6 – O ciclo frigorífico de Carnot.



## 2.2. Ciclo Frigorífico

### □ O Ciclo de Carnot

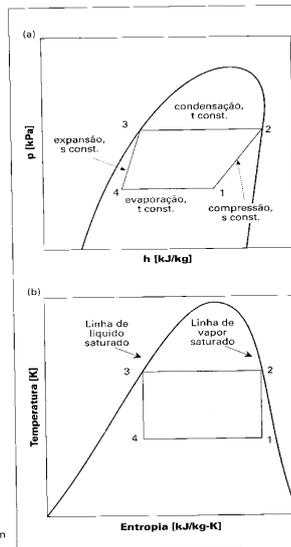


Figura 2.8 – O ciclo de Carnot (a) em um diagrama p-h; (b) em um diagrama T-s.

## 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 isentrópica;
  - 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);

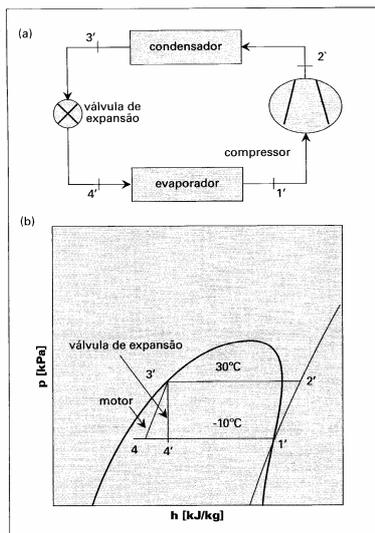
## 2.2. Ciclo Frigorífico

- 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) 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:  $q = q_{\text{latente de vaporização}}$ .
- Sistema real:
  - $T > T_v$
  - A  $T$  do líquido refrigerante tem que ser reduzida à  $T_v$  assim:  
Efeito refrigerante (ER) <  $q_{\text{latente de vaporização}}$   
 $ER = q_{\text{latente de vaporização}} - q_{\text{do líquido no controle do refrigerante}}$

## 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  $-10^{\circ}\text{C}$ , enquanto que a T do líquido que se aproxima do dispositivo de expansão é  $30^{\circ}\text{C}$ . 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:

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

## 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.

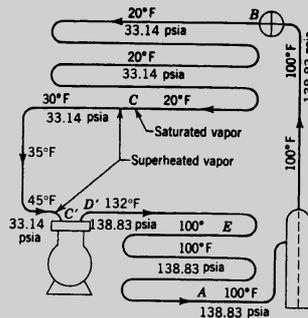
## 2.3. Ciclo Frigorífico Real

### □ Super-aquecimento do vapor de admissão

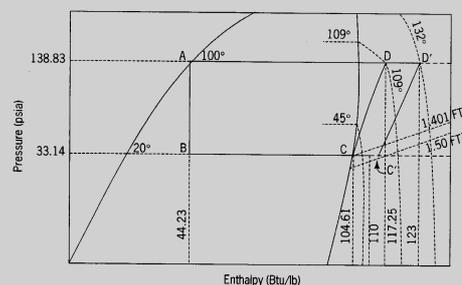
- O refrigerante sai do evaporador e continua a absorver calor se tornando super-aquecido antes do compressor
  - Para uma mesma P a T aumenta;
  - O calor na compressão aumenta ⇒ aumenta a quantidade de calor que deve ser rejeitado na condensação. Parte do calor a ser rejeitado é sensível;
  - O volume 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 C' 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  $\Rightarrow$  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:

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

$$\text{COP} = \frac{\text{Efeito refrigerante}}{\text{Potência que deve ser fornecida}}$$

- 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:

$$q_e = 110 - 44,23 = 65,77 \text{ BTU/lb}$$

- 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.

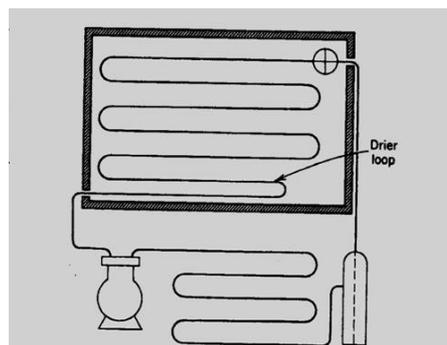


Fig. 11-3 Flow diagram showing drier loop for superheating suction vapor inside refrigerated space.

## 2.3. Ciclo Frigorífico Real

### □ Sub-resfriamento do líquido

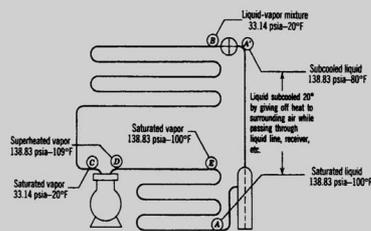


Fig. 11-5 Flow diagram illustrating subcooling of the liquid in the liquid line. (Refrigerant-134a)

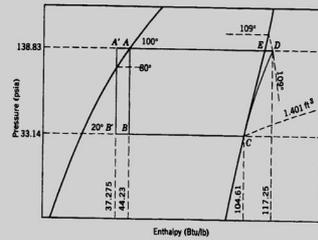


Fig. 11-4 Pressure-enthalpy diagram comparing the subcooled cycle with the simple saturated cycle. (Refrigerant-134a)

## 2.3. Ciclo Frigorífico Real

### □ Sub-resfriamento do líquido:

- O efeito refrigerante aumenta:
 
$$q_e = 104,61 - 37,27 = 65,77 \text{ BTU/lb}$$
- Se  $q_e$  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 copressor.

## 2.3. Ciclo Frigorífico Real

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

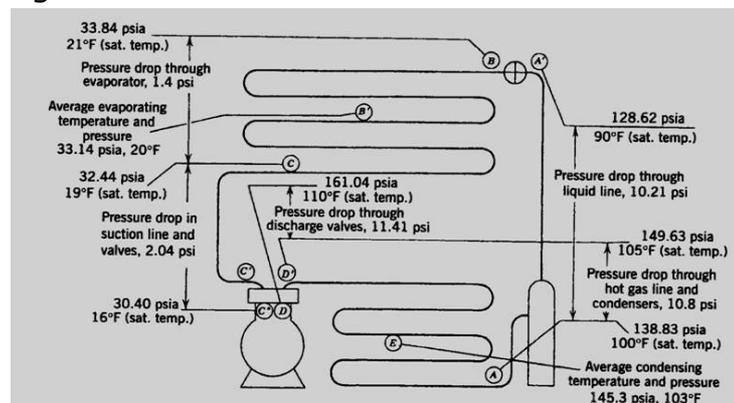
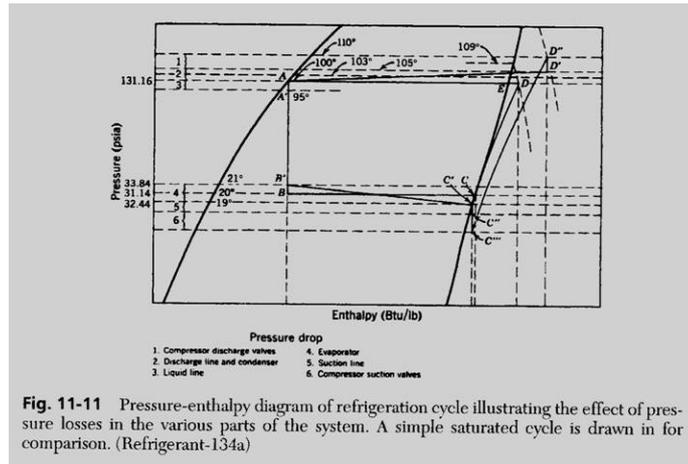


Fig. 11-10 Flow diagram illustrating the effect of pressure drop in various parts of the system. Pressure drops are exaggerated for clarity. (Refrigerant-134a)

## 2.3. Ciclo Frigorífico Real

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



## Para a próxima aula

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