

Sistemas de Refrigeração

Parte I

Tópicos da Aula de Hoje

- ⇒ Introdução / definições sobre sistemas de refrigeração
- ⇒ Ciclo de refrigeração por compressão
- ⇒ Fatores que influenciam o desempenho do sistema de refrigeração

Introdução

⇒ Princípio Básico

- Para uma substância passar do estado líquido para o gasoso é necessário que lhe seja fornecido calor durante um certo período, até que se atinja a temperatura de evaporação da mesma.
 - Portanto, ao evaporar, a substância “retira” calor de um ambiente ou de um corpo.
- O fluxo de calor sempre ocorre da fonte quente para a fonte fria, logo quanto maior a diferença de temperatura entre as fontes, maior será o fluxo de calor.
 - Assim, é de grande importância que esse transporte de calor se dê de modo eficiente, com um mínimo de perdas.

Introdução

⇒ Como conseguir essa diferença de temperatura???

- Por exemplo, considere que a fonte quente esteja a 25°C e que sejam utilizados os alimentos de um refrigerador comum. Se utilizarmos a água pura como agente refrigerante, conseguiremos resfriar esses alimentos?
- ***A resposta da pergunta anterior é não. Logo, para conseguir isso é necessário utilizar substâncias que evaporem a baixas temperaturas.***

Introdução

⇒ Agentes refrigerantes ou simplesmente Refrigerantes

- CFC 12 (diclorodifluormetano) – ebulição a $-29,8^{\circ}\text{C}$ (nível do mar)
- CFC 22 (monoclorodifluormetano) – ebulição a $-40,8^{\circ}\text{C}$ (nível do mar)
- Com a substituição progressiva dos fluidos da família CFC estão sendo aplicados refrigerantes alternativos:
 - Fluocarbonos parcialmente halogenados (HFC): contêm, além de fluor, átomos de hidrogênio na molécula.
 - Hidrocarbonetos não halogenados (HC)

Introdução

⇒ O processo de refrigeração, em que o calor é transferido de um ambiente para outro, se dá obedecendo a um **ciclo termodinâmico**.

⇒ Neste curso, será abordado o **ciclo de refrigeração padrão por compressão**, mas antes de explicar suas características, algumas definições importantes são necessárias.

Definições

⇒ **Temperatura de saturação:** é a temperatura na qual se dá a vaporização de uma substância pura a uma dada pressão (pressão de saturação).

- Ex.: para a água a 100°C , a pressão de saturação é 1,01325 bar. Logo, para a água a 1,01325 bar, a temperatura de saturação é 100°C .

⇒ **Líquido saturado:** quando uma substância encontra-se em estado líquido à temperatura e pressão de saturação.

⇒ **Líquido sub-resfriado (líquido comprimido):** quando a temperatura do líquido é menor que a temperatura de saturação para a pressão existente.

⇒ **Vapor saturado (vapor saturado seco):** quando uma substância se encontra completamente como vapor na temperatura de saturação.

⇒ **Vapor superaquecido:** quando o vapor está a uma temperatura maior do que a temperatura de saturação.

Definições

⇒ **Energia interna (u)**: é a energia possuída pela matéria devido ao movimento e/ou forças intermoleculares. É decomposta em duas partes:

- Energia cinética – devida à velocidade das moléculas
- Energia potencial – devida às forças de atração existente entre as moléculas.

⇒ **Entalpia (h)**: grandeza física que busca medir a energia em um sistema termodinâmico que está disponível na forma de calor, à pressão constante. Sendo P a pressão e V o volume de um sistema, tem-se:

$$h = u + PV$$

⇒ **Entropia (s)**: é uma medida do grau de desordem molecular de um sistema termodinâmico. Exemplo de aumento de entropia: gelo derretendo.

⇒ **Título (x)**: é a relação entre a massa de vapor e a massa total (líquido+vapor).

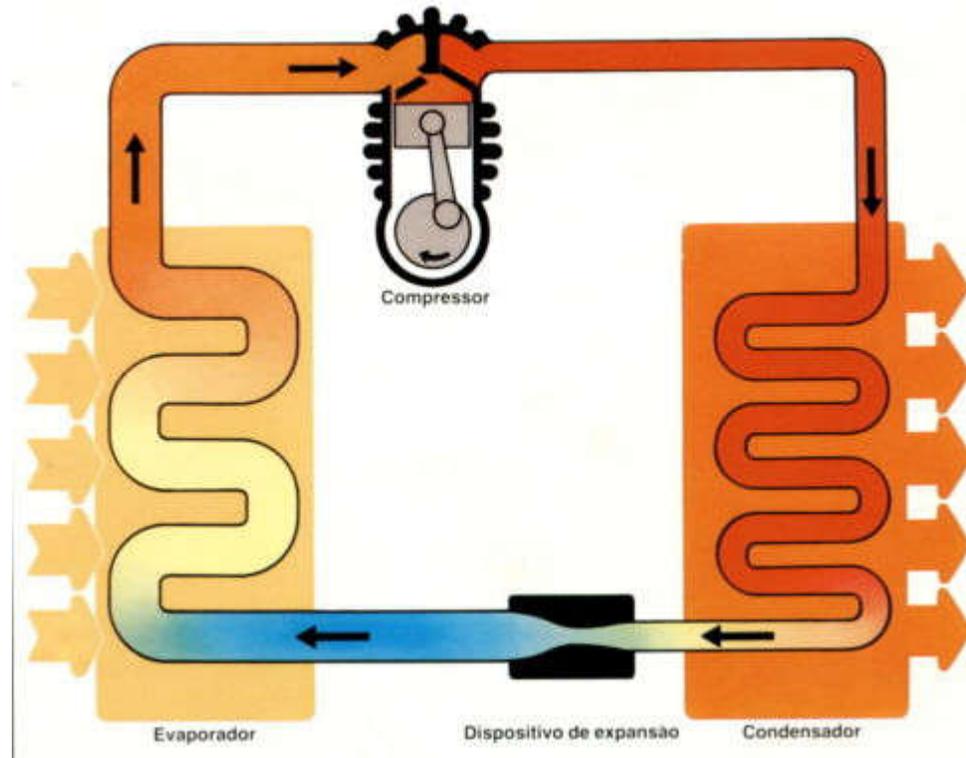
$$x = \frac{m_v}{m_L + m_v} = \frac{m_v}{m_t}$$

Ciclo de Refrigeração por Compressão

⇒ É o ciclo termodinâmico dos refrigeradores e aparelhos de ar condicionado.

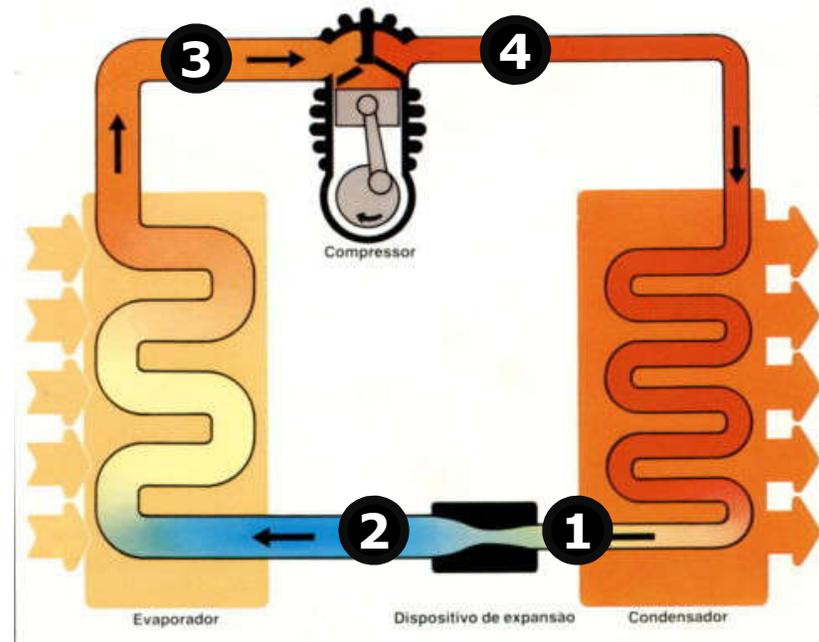
⇒ Principais componentes:

- Compressor
- Condensador
- Dispositivo de Expansão
- Evaporador



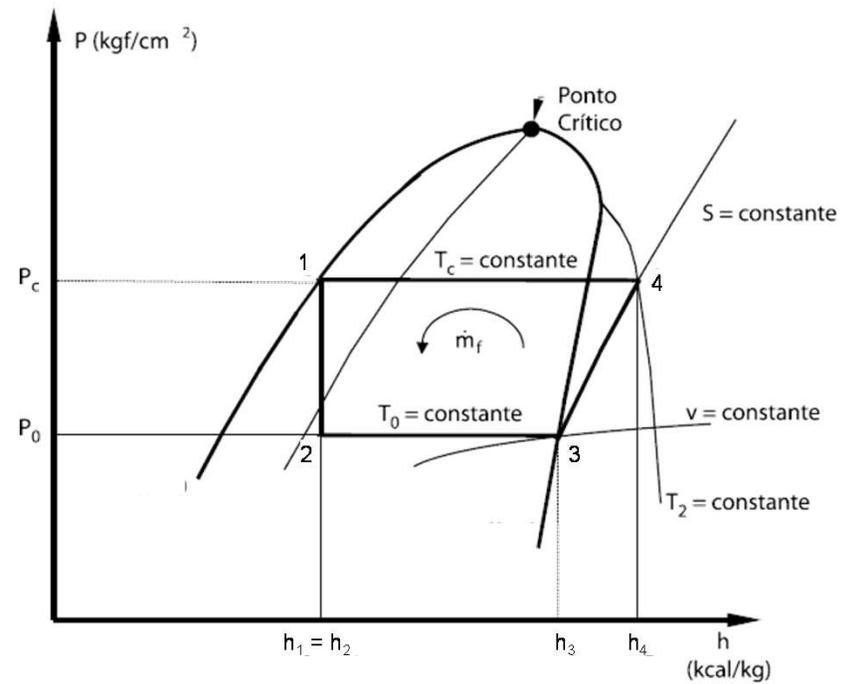
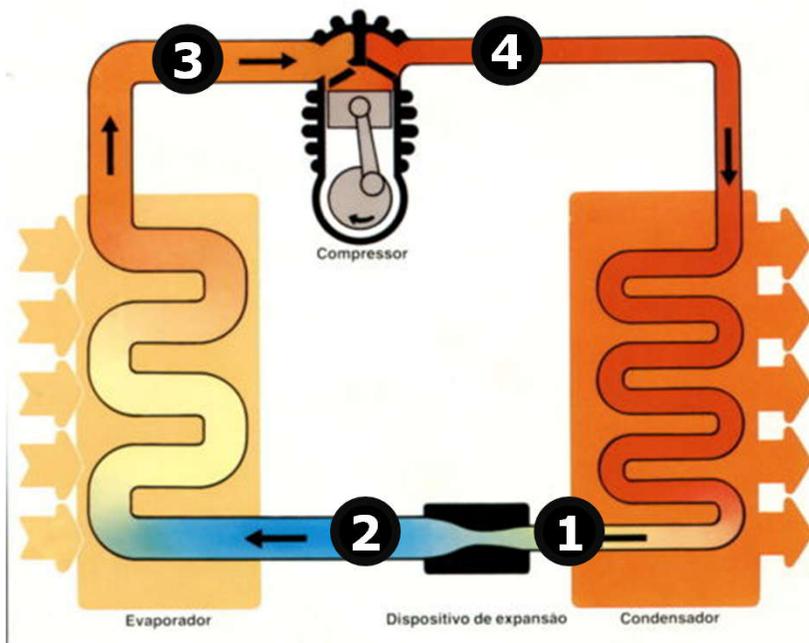
Ciclo de Refrigeração por Compressão

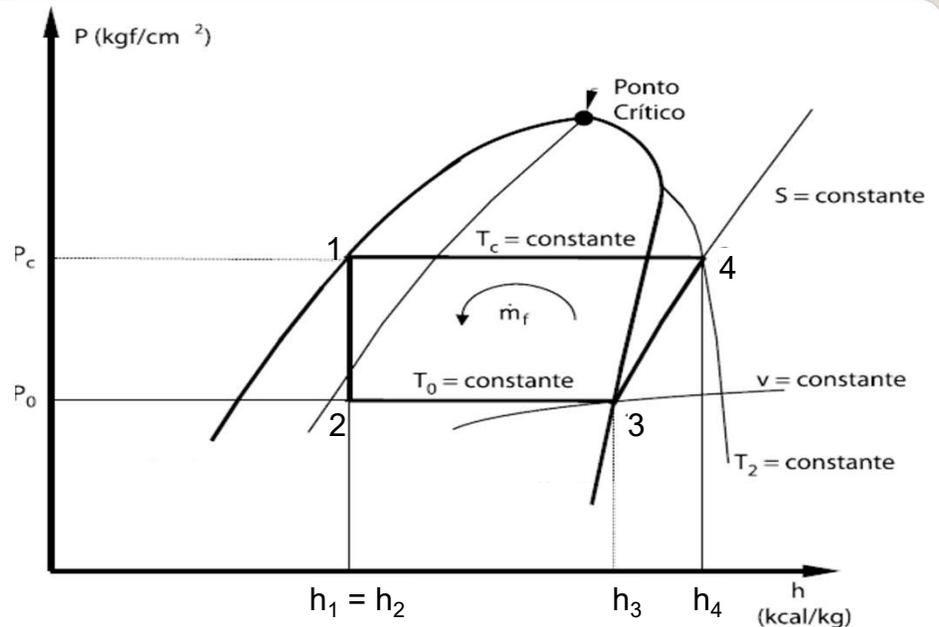
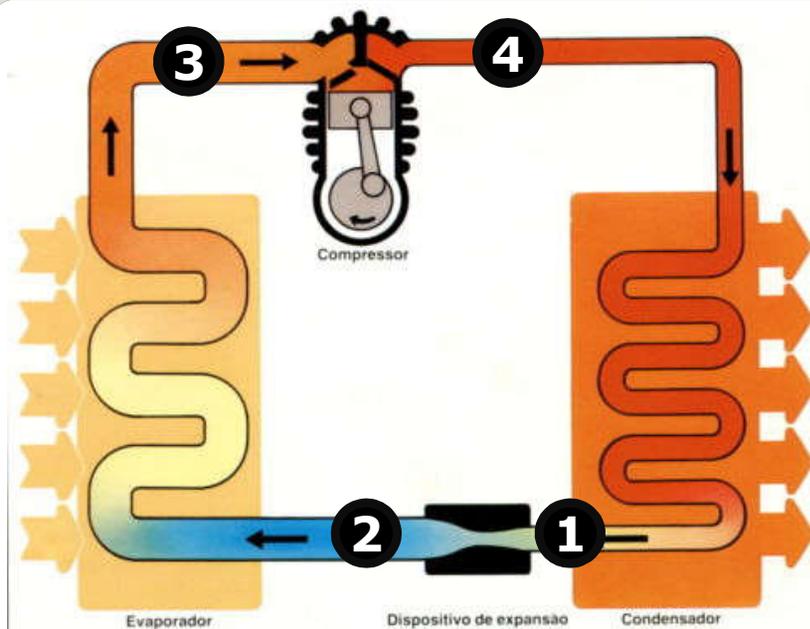
- 1** → **2** ⇒ O líquido passa pelo dispositivo de expansão, sendo submetido a uma queda de pressão brusca e então passa a ter dois estados: líquido e gasoso. A temperatura cai ao valor da temperatura de evaporação do refrigerante.
- 2** → **3** ⇒ O refrigerante entra no evaporador e se vaporiza, absorvendo o calor do ambiente a ser refrigerado.
- 3** → **4** ⇒ O vapor é succionado pelo compressor, que aumenta sua pressão e temperatura.
- 4** → **1** ⇒ O refrigerante segue diretamente ao condensador, onde o calor retirado do ambiente a ser refrigerado é rejeitado para as vizinhanças, causando sua mudança de estado de vapor para líquido.



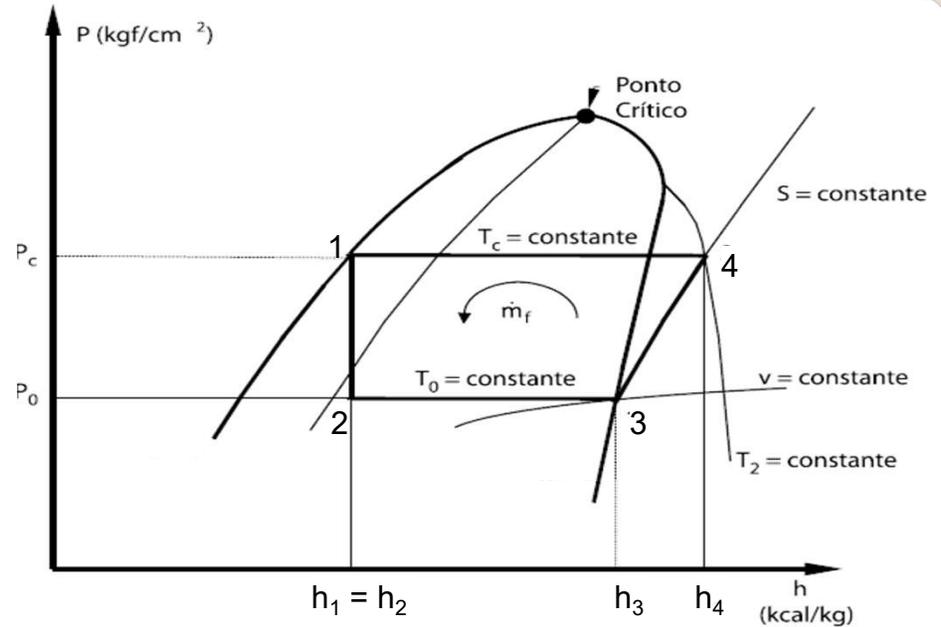
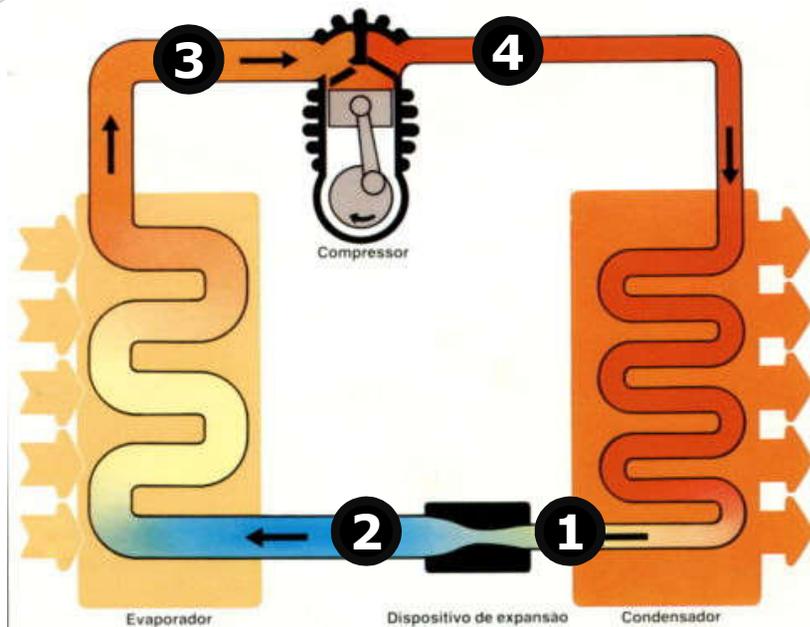
Ciclo de Refrigeração por Compressão

⇒ Ciclo termodinâmico ideal (Diagrama de Mollier)





- **Processo 1 – 2:** ocorre no dispositivo de expansão. É um processo isoentálpico em que o líquido sofre uma queda de pressão até sua pressão de vaporização (P_0) e a temperatura cai até a sua temperatura de evaporação (T_0).
- **Processo 2 – 3:** processo de transferência de calor à pressão e temperatura constantes.



- **Processo 3 – 4:** ocorre no compressor. O refrigerante é comprimido até a pressão de condensação (P_C) e tem sua temperatura aumentada até um valor maior que a temperatura de condensação. O processo é isoentrópico.
- **Processo 4 – 1:** ocorre no condensador. O calor do refrigerante é rejeitado ao meio à pressão constante (P_C) e a temperatura cai até a temperatura de condensação, permanecendo constante até o vapor se tornar líquido saturado.

Ciclo de Refrigeração por Compressão

⇒ Trabalho do compressor (W_C)

$$W_C = m \cdot (h_4 - h_3)$$

⇒ Calor adicionado no evaporador (Q_{entra}) (capacidade frigorífica)

$$Q_{entra} = m \cdot (h_3 - h_2)$$

⇒ Calor rejeitado no condensador (Q_{sai})

$$Q_{sai} = m \cdot (h_4 - h_1)$$

⇒ Válvula de expansão: $h_2 = h_1$

⇒ Coeficiente de desempenho (COP)

$$COP = Q_{entra} / W_C$$

h = entalpia específica do fluido (kJ/kg)

m = vazão em massa do fluido (kg/s)

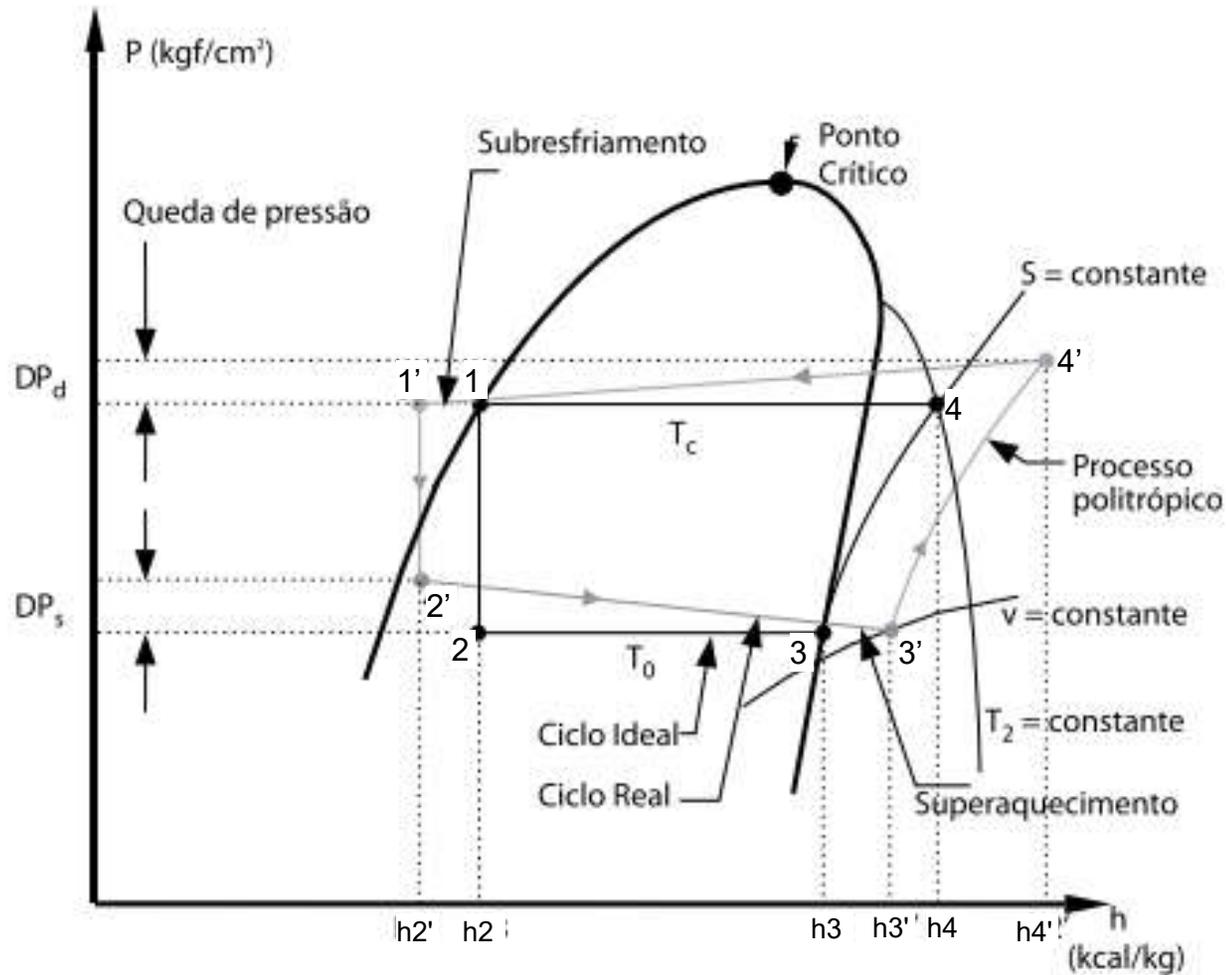
Ciclo de Refrigeração por Compressão

⇒ Ciclo termodinâmico real

- Considera as perdas envolvidas em todas as etapas do ciclo:
 - ✓ Quedas de pressão causadas pelo atrito da passagem do refrigerante pelo sistema
 - ✓ Superaquecimento do vapor na sucção para evitar a entrada de líquido no compressor
 - ✓ Sub-resfriamento do líquido na saída do condensador, criando um novo estado representado por h_1 ,

Ciclo de Refrigeração por Compressão

⇒ Ciclo termodinâmico real



Ciclo de Refrigeração por Compressão

⇒ Ciclo termodinâmico real

- No processo de compressão ocorrem perdas de energia no compressor e o mesmo perde uma pequena quantidade de calor ao meio ambiente. O processo real deixa de ser isoentrópico.
- Este efeito é observado considerando o rendimento do compressor por meio da seguinte expressão:

$$\eta = \frac{h_4 - h_3}{h_{4'} - h_3}$$

- O novo valor de entalpia $h_{4'}$ corresponde ao ciclo real.

Exemplos

⇒ (1) Um refrigerante 134a é utilizado em um ciclo de compressão de vapor em que o vapor saturado entra no compressor a 0°C e o líquido saturado deixa o condensador a 26°C . A vazão mássica do refrigerante é $0,08\text{ kg/s}$, sabendo que a temperatura do compartimento frio é de 0°C e do compartimento quente é de 26°C . Determinar:

- (a) A potência do compressor em kW
- (b) A capacidade frigorífica em TR (tonelada de refrigeração. $1\text{ TR} = 3,517\text{ kW}$)
- (c) O COP
- (d) Verificar se os resultados encontrados estão de acordo com a 1ª Lei da Termodinâmica.

Solução Exemplo (1)

⇒ Inicialmente, é necessário conhecer o ciclo termodinâmico para o refrigerante em questão. Assim, são dados:

Estado	T (°C)	P (bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Título	Situação
1	26	6,86	85,75	0,32	0	Líqu. Saturado
2	0	2,93	85,75	0,3269	0,18	Líqu. Vapor
3	0	2,93	247,20	0,919	1	Vapor saturado
4	30	6,86	265,30	0,919		Vapor superaquecido

⇒ (a) potência do compressor:

- Entalpia na saída do compressor: $h_4 = 265,3 \text{ kJ/kg}$
- Entalpia na entrada do compressor: $h_3 = 247,2 \text{ kJ/kg}$
- Logo:

$$W_C = 0,08 \times (265,3 - 247,2) = \mathbf{1,45 \text{ kW}}$$

Solução Exemplo (1)

Estado	T (°C)	P (bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Título	Situação
1	26	6,86	85,75	0,32	0	Líquido saturado
2	0	2,93	85,75	0,3269	0,18	Líquido vapor
3	0	2,93	247,20	0,919	1	Vapor saturado
4	30	6,86	265,30	0,919		Vapor superaquecido

⇒ (b) Capacidade frigorífica: calor adicionado no evaporador (Q_{entra})

- Entalpia na saída do evaporador: $h_3 = 247,2 \text{ kJ/kg}$
- Entalpia na entrada do evaporador: $h_2 = 85,75 \text{ kJ/kg}$
- Logo:

$$Q_{\text{entra}} = 0,08 \times (247,2 - 85,75) = 12,92 \text{ kW}$$

- Convertendo em TR

$$Q_{\text{entra}} = 3,67 \text{ TR}$$

Solução Exemplo (1)

$$\Rightarrow (c) \text{ COP} = Q_{\text{entra}} / W_C$$

- Portanto:

$$\text{COP} = 12,92 / 1,45$$

$$\text{COP} = 8,9$$

OBS.:

O valor de COP calculado anteriormente não está de acordo com situações práticas. O elevado valor foi encontrado porque foi considerado o ciclo termodinâmico ideal. Na prática, o valor de COP cai para 3 a 3,5, a depender do refrigerante.

Solução Exemplo (1)

⇒ (d) Verificar a 1ª Lei da Termodinâmica

- De acordo com a 1ª Lei da Termodinâmica o total da energia que entra no sistema deve ser igual ao total de energia que sai do mesmo. Assim, tem-se

$$Q_{\text{evap}} + W_C = Q_{\text{cond}}$$

$$12,92 + 1,45 = (h_4 - h_1) \times 0,08$$

$$**14,36 = 14,36**$$

Exemplos

⇒ (2) No exemplo anterior, considere que o vapor saturado que sai do evaporador entra no compressor a -12°C e o líquido saturado sai a uma pressão de 9bar do condensador. Repetir os itens (a), (b) e (c).

⇒ Montando novamente a tabela, tem-se:

Estado	T ($^{\circ}\text{C}$)	P (bar)	h (kJ/hg)	s (kJ/kgK)	Título	Situação
1	35,5	9,00	99,56	0,3656	0	Líqu. Saturado
2	-12	1,85	99,56	0,3360		Líqu. Vapor
3	-12	1,85	240,15	0,9267	1	Vapor saturado
4	40	9,00	271,25	0,9267		Vapor superaquecido

Exemplos

⇒ ANTES

Estado	T (°C)	P (bar)	h (kJ/hg)	s (kJ/kgK)	Título	Situação
1	26	6,86	85,75	0,32	0	Líqu. Saturado
2	0	2,93	85,75	0,3269	0,18	Líqu. Vapor
3	0	2,93	247,20	0,919	1	Vapor saturado
4	30	6,86	265,30	0,919		Vapor superaquecido

⇒ DEPOIS

Estado	T (°C)	P (bar)	h (kJ/hg)	s (kJ/kgK)	Título	Situação
1	35,5	9,00	99,56	0,3656	0	Líqu. Saturado
2	-12	1,85	99,56	0,3360		Líqu. Vapor
3	-12	1,85	240,15	0,9267	1	Vapor saturado
4	40	9,00	271,25	0,9267		Vapor superaquecido

Solução Exemplo (2)

Estado	T (°C)	P (bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Título	Situação
1	35,5	9,00	99,56	0,3656	0	Líquido saturado
2	-12	1,85	99,56	0,3360		Líquido vapor
3	-12	1,85	240,15	0,9267	1	Vapor saturado
4	40	9,00	271,25	0,9267		Vapor superaquecido

⇒ (a) potência do compressor:

- Entalpia na saída do compressor: $h_4 = 271,25$ kJ/kg
- Entalpia na entrada do compressor: $h_3 = 240,15$ kJ/kg
- Logo:

$$W_C = 0,08 \times (271,25 - 240,15) = \mathbf{2,49 \text{ kW}}$$

Solução Exemplo (2)

Estado	T (°C)	P (bar)	h (kJ/hg)	s (kJ/kgK)	Título	Situação
1	35,5	9,00	99,56	0,3656	0	Líqu. Saturado
2	-12	1,85	99,56	0,3360		Líqu. Vapor
3	-12	1,85	240,15	0,9267	1	Vapor saturado
4	40	9,00	271,25	0,9267		Vapor superaquecido

⇒ (b) Capacidade frigorífica: calor adicionado no evaporador (Q_{entra})

- Entalpia na saída do evaporador: $h_3 = 240,15$ kJ/kg
- Entalpia na entrada do evaporador: $h_2 = 99,56$ kJ/kg
- Logo:

$$Q_{\text{entra}} = 0,08 \times (240,15 - 99,56) = 11,25 \text{ kW}$$

- Convertendo em TR

$$Q_{\text{entra}} = 3,20 \text{ TR}$$

Solução Exemplo (2)

$$\Rightarrow \text{(c) COP} = Q_{\text{entra}} / W_C$$

- Portanto:

$$\text{COP} = 11,25 / 2,49$$

$$\text{COP} = 4,53$$

Conclusão:

Diminuindo a temperatura de evaporação implica no aumento do trabalho requerido no compressor, na diminuição do efeito de refrigeração e na diminuição do coeficiente de performance.

Exemplos

⇒ **(3)** No exemplo anterior considere uma eficiência do compressor de 80% e a temperatura do líquido que deixa o condensador igual a 30° C. Repetir os itens (a), (b) e (c). **(considerar que não há quedas de pressão no evaporador e no condensador).**

⇒ Nota-se que a temperatura de condensação passou de 35,5° C para 30° C, ou seja, ocorreu sub-resfriamento do líquido na saída do condensador. Portanto, surgiu o estado 1' referente ao líquido sub-resfriado.

⇒ Deve-se calcular a entalpia referente ao estado 4' (saída do compressor), de forma a considerar sua eficiência de 80%. Logo:

$$\eta = \frac{h_4 - h_3}{h_{4'} - h_3} \Rightarrow 0,80 = \frac{271,5 - 240,15}{h_{4'} - 240,15}$$

$$h_{4'} = 279 \text{ kJ/kg}$$

Solução Exemplo (3)

⇒ Utilizando o ciclo termodinâmico do refrigerante encontra-se que a entropia para esse estado (4') é 0,958 kJ/kgK.

⇒ Portanto, a tabela atualizada para o ciclo real é a seguinte.

Estado	T (°C)	P (bar)	h (kJ/hg)	s (kJ/kgK)	Situação
1	35,5	9,00	99,56	0,3656	Líqu. Saturado
2	-12	1,85	99,56		Líqu. Vapor
3	-12	1,85	240,15	0,9267	Vapor saturado
4	41,5	9,00	271,25	0,9267	Vapor superaquecido
1'	30	9,00	99,56	0,3396	Líqu. Sub-resfriado
4'	49	9,00	279	0,958	Vapor superaquecido

Solução Exemplo (3)

Estado	T (°C)	P (bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Situação
1	35,5	9,00	99,56	0,3656	Líquido saturado
2	-12	1,85	99,56		Líquido vapor
3	-12	1,85	240,15	0,9267	Vapor saturado
4	41,5	9,00	271,25	0,9267	Vapor superaquecido
1'	30	9,00	99,56	0,3396	Líquido sub-resfriado
4'	49	9,00	279	0,958	Vapor superaquecido

⇒ (a) potência do compressor:

- Entalpia na saída do compressor: $h_{4'} = 279 \text{ kJ/kg}$
- Entalpia na entrada do compressor: $h_3 = 240,15 \text{ kJ/kg}$
- Logo:

$$W_C = 0,08 \times (279 - 240,15) = \mathbf{3,11 \text{ kW}}$$

Solução Exemplo (3)

Estado	T (°C)	P (bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Situação
1	35,5	9,00	99,56	0,3656	Líquido saturado
2	-12	1,85	99,56		Líquido vapor
3	-12	1,85	240,15	0,9267	Vapor saturado
4	41,5	9,00	271,25	0,9267	Vapor superaquecido
1'	30	9,00	99,56	0,3396	Líquido sub-resfriado
4'	49	9,00	279	0,958	Vapor superaquecido

⇒ (b) Capacidade frigorífica: calor adicionado no evaporador (Q_{entra})

- Entalpia na saída do evaporador: $h_3 = 240,15 \text{ kJ/kg}$
- Entalpia na entrada do evaporador: $h_2 = 99,56 \text{ kJ/kg}$
- Logo:

$$Q_{\text{entra}} = 0,08 \times (240,15 - 99,56) = 11,25 \text{ kW}$$

- Convertendo em TR

$$Q_{\text{entra}} = 3,20 \text{ TR}$$

Solução Exemplo (3)

$$\Rightarrow \text{(c) COP} = Q_{\text{entra}} / W_C$$

- Portanto:

$$\text{COP} = 11,25 / 3,11$$

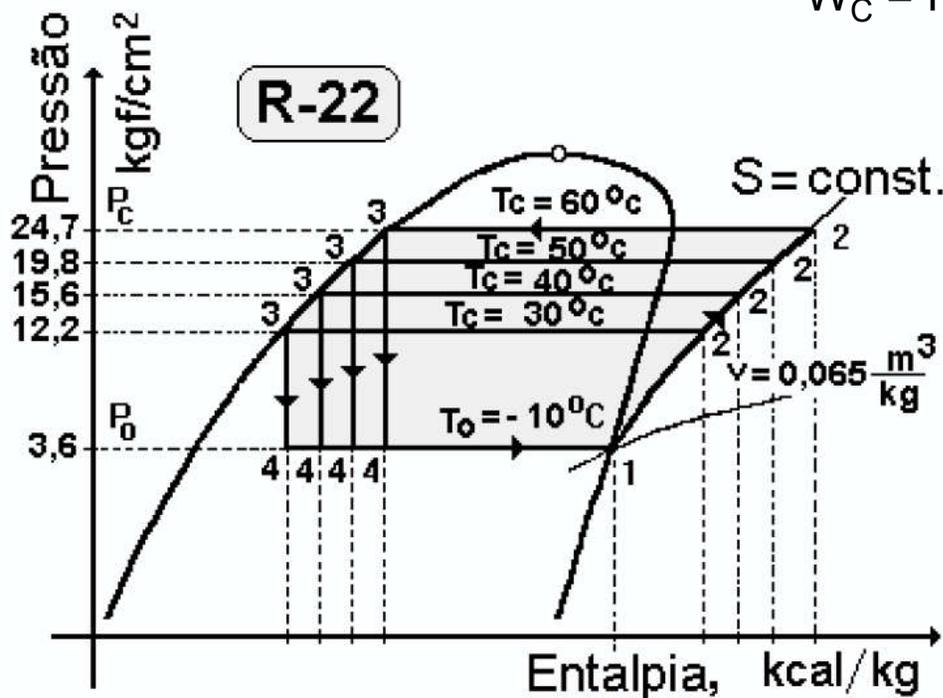
$$\text{COP} = 3,62$$

Parâmetros que Influenciam o COP

⇒ Influência da temperatura de condensação no ciclo teórico

- No geral, a cada 1° C de redução na temperatura de condensação, reduz-se o consumo de energia entre 1,5 e 3%. Ver trabalho do compressor:

$$W_C = m \cdot (h_2 - h_1)$$



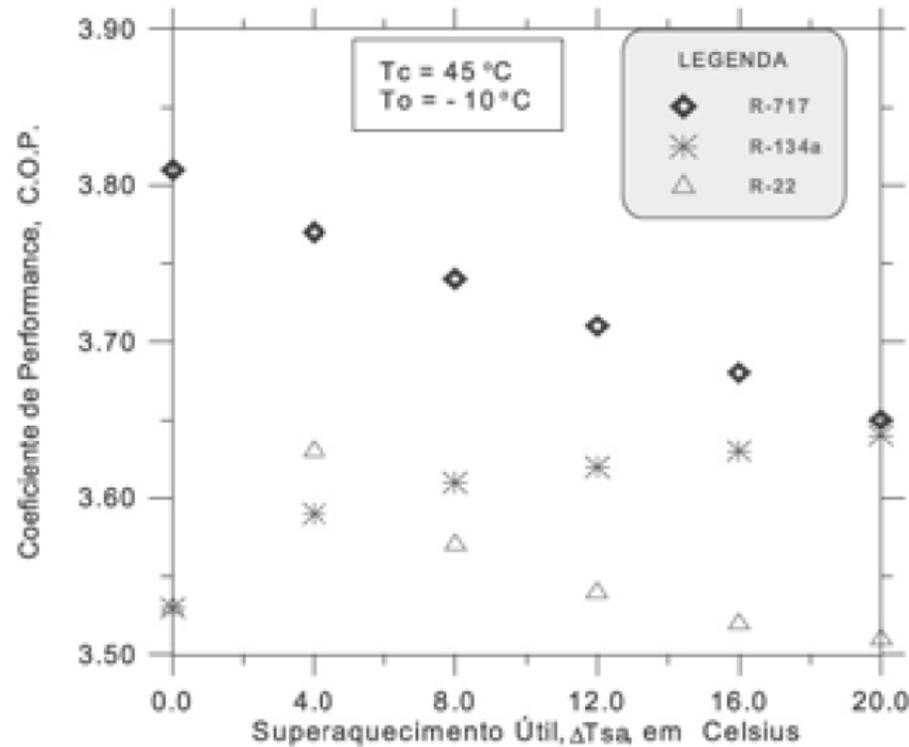
Neste exemplo:

- 1-2: Compressão
- 2-3: Condensação
- 3-4: Expansão
- 4-1: Evaporação

Parâmetros que Influenciam o COP

⇒ Influência do superaquecimento do líquido no ciclo teórico

- Depende do tipo do refrigerante. Pode tanto aumentar quanto reduzir o COP.



Próxima Aula

⇒ **Sistemas de Ar Condicionado**