

## Controle Térmico de Ambientes

(Fernando França, DE – FEM Unicamp, [f França@fem.unicamp.br](mailto:f França@fem.unicamp.br))

### Criogenia:

Em meados do século XIX o homem descobriu a propriedade criogênica de gases: a capacidade de retirar calor de um sistema quando submetido à expansão. E começou a fazer gelo, industrialmente, em grande escala. A partir dessa época, então, tem início a atividade comercial de conservação de alimentos em grande escala. Não havia, sequer, os grandes entrepostos frigoríficos, mas sim as fábricas de gelo. Nos setores comercial e residencial este gelo industrial era usado para fazer essa conservação dos alimentos em pequena escala.

Os gases refrigerantes usados neste início da história da refrigeração eram a amônia, o dióxido de enxofre e o cloreto de metil. A refrigeração era, assim, um processo perigoso: explosivo, inflamável e tóxico! Além do que, necessitavam de pressão elevada para atingir capacidade criogênica necessária à fabricação econômica de gelo. Os compressores frigoríficos de então, dada a limitação tecnológica da época, eram tidos como máquinas perigosas, sujeitas a explosão. **(Imagine se o compressor frigorífico do ar-condicionado do seu carro estivesse sujeito a explodir! Poderia causar um estrago similar ao que mostra a figura abaixo!)**



**Incauto Enche Botijão de Gás de Cozinha em Posto de GNV**

Somente em 1932 o cientista Thomas Midgely Jr inventou o Refrigerante 12, mais conhecido como Freon 12. O Freon 12 é um cloro-flúor-carbono (CFC) que tem a característica de ser endotérmico quando expande ou quando vaporiza. O Freon não é inflamável, não é explosivo, não é tóxico e não corroi metais. A pressão necessária para que suas propriedades criogênicas ocorram com transferência apreciável de calor para ser aplicada praticamente, era bem inferior à requerida pelos gases refrigerantes conhecidos até então. Enfim, um “gás ideal”, “maravilhoso”. Isto é, até descobrirem que o Freon destrói o ozônio da atmosfera, tão importante para barrar o excesso de radiação solar ultra-violeta na superfície da Terra:



O excesso de radiação UV deteriora a visão dos seres, altera a fotossíntese de vários cultivares, como a soja, o feijão, de hortaliças, como o repolho, além de intensificar o desenvolvimento de câncer de pele nos seres humanos.

E o Freon, nessas alturas, já era usado para outros fins:

Freon 11 (CFC-11) >> produção de espumas de poliestireno

Freon 12 (CFC-12) >> ciclos de refrigeração

Freon 13 (CFC-13) >> limpeza de circuito eletrônico

**Solução:**

Usar outros gases refrigerantes, o **hidro-cloro-fluor-carbono – HCFC** – e o **isobutano**, por exemplo.

**Banimento dos CFCs:**

**Regulação a nível mundial >>Protocolo de Montreal!!**

## O Ciclo de Refrigeração

Os ciclos de refrigeração, isto é, ciclos termodinâmicos de fluidos refrigerantes em equipamentos frigoríficos por compressão de vapor, são adequadamente representados em diagramas  $P \times h$  (pressão-entalpia, diagrama de Mollier) e diagrama  $T \times s$  (temperatura-entropia).

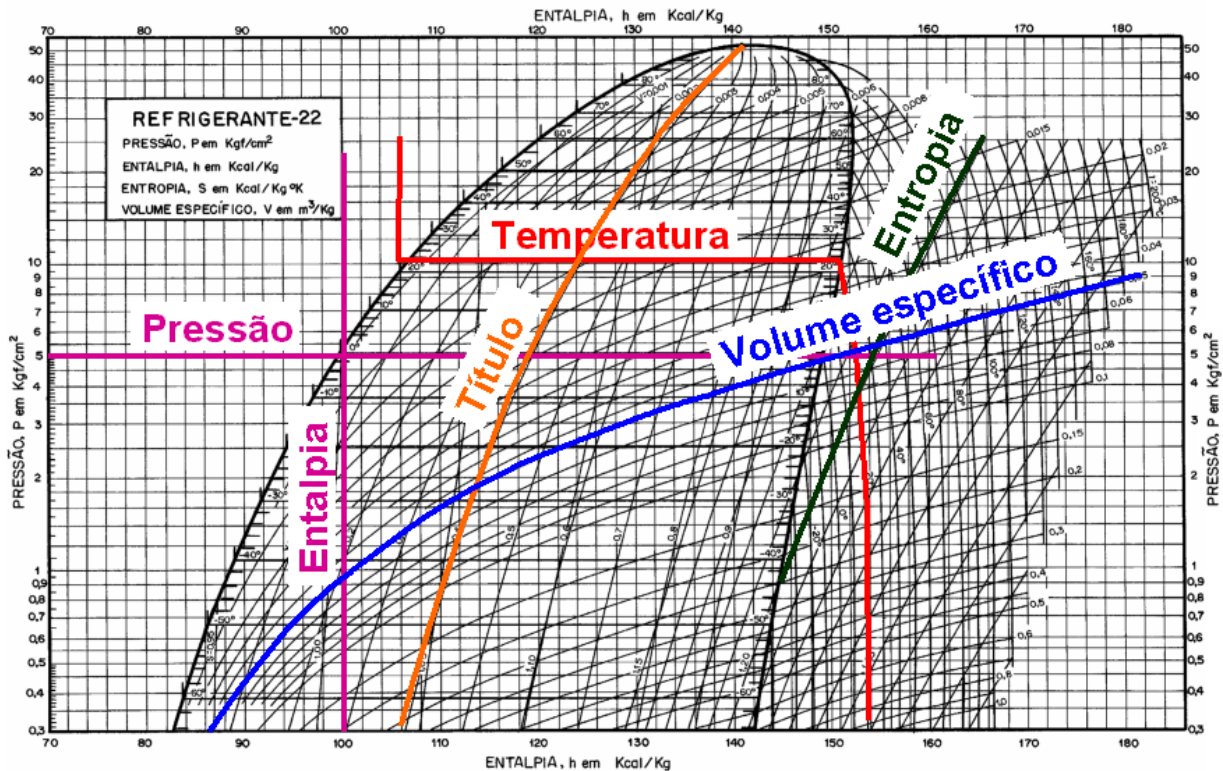
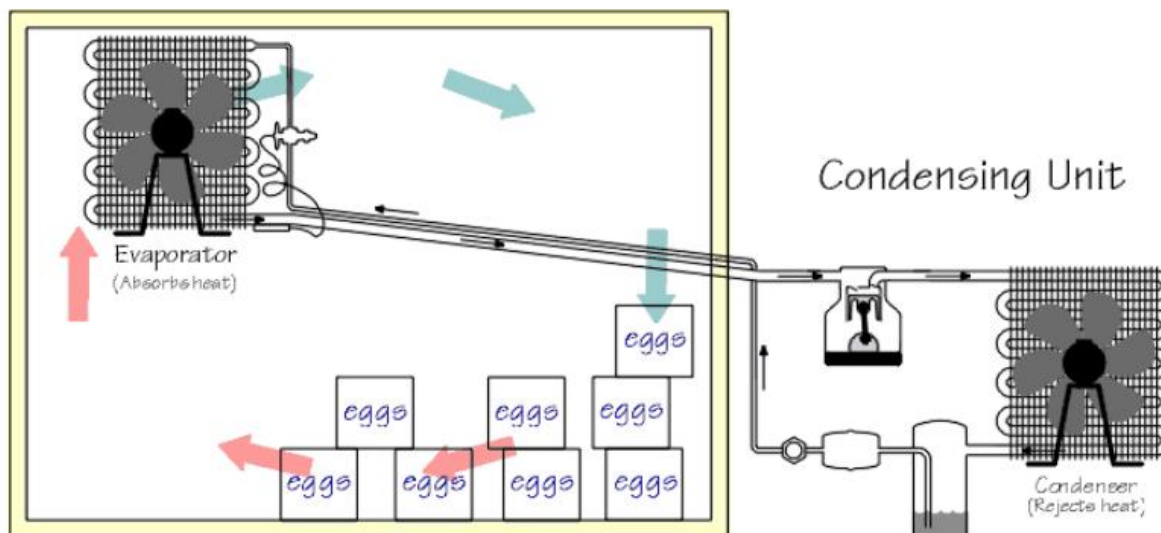


Diagrama de Mollier ( $P \times h$ ) para o refrigerante 22 (Freon 22)

Observe, no diagrama de Mollier, as regiões de líquido sub-resfriado, à esquerda de  $x = 0$ , de vapor úmido,  $0 < x < 1$ , no envelope, e vapor super-aquecido, à direita de  $x = 1$ .

O ciclo de compressão de vapor é o mais utilizado em equipamentos frigoríficos para produção de frio: para conforto térmico ambiente e para resfriamento e congelamento de produtos.

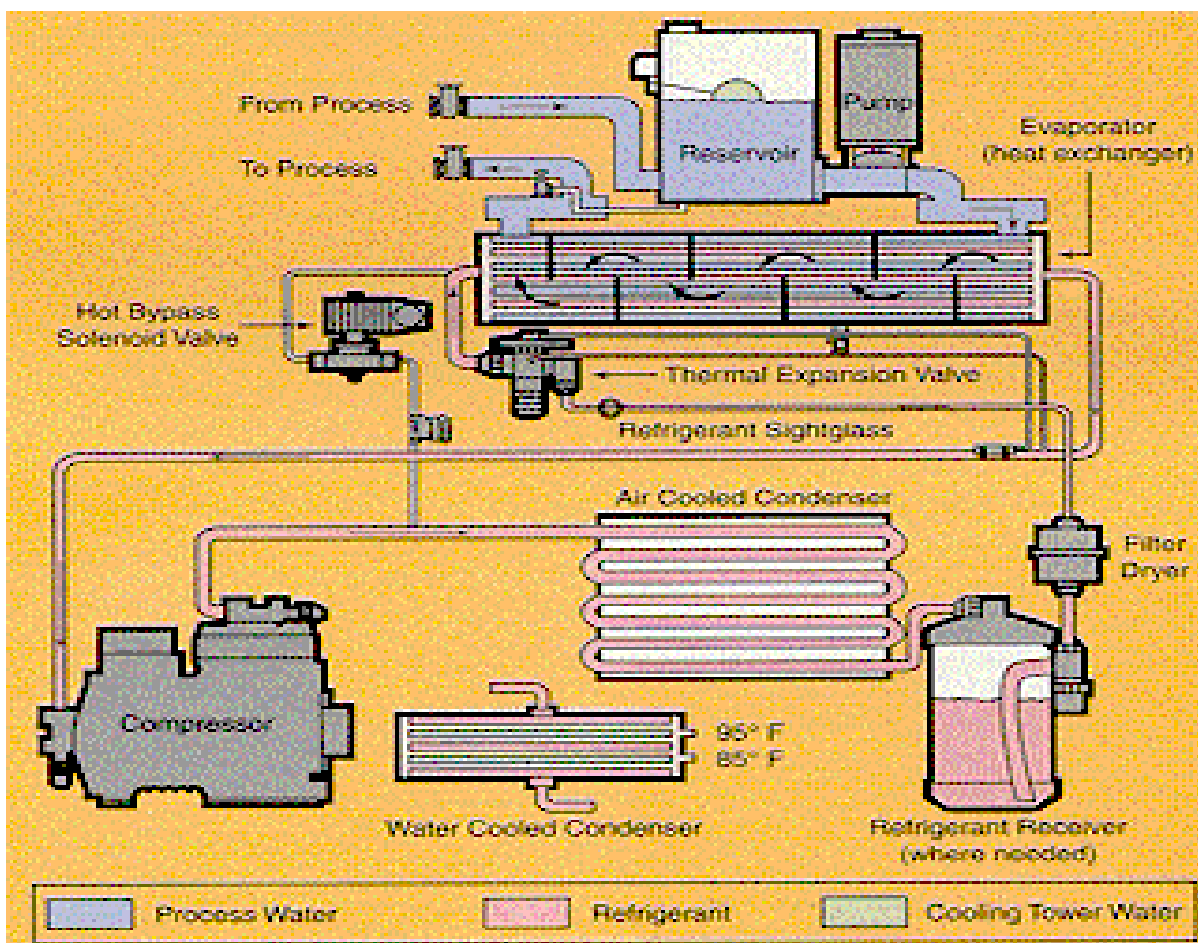


### Frigorífico de produtos por compressão de vapor por expansão direta

O esquema acima representar um sistema frigorífico para produtos: os ovos estão na câmara frigorífica, que é mantida à temperatura baixa pela troca de calor que ocorre no evaporador. O evaporador é um trocador de calor (no caso, de tubos aletados) que resfria o ar que circula na câmara, movimentado pela ação do ventilador. No evaporador ocorre a evaporação do fluido refrigerante, idealmente um processo isobárico (na realidade, com pequena variação de pressão). Ainda no interior da câmara, próximo do evaporador, está o dispositivo de expansão (a válvula termostática). Este então é um dispositivo frigorífico de expansão direta: a expansão ocorre no ambiente a ser resfriado. No exterior da câmara estão o compressor e o condensador (e outros dispositivos auxiliares, como o vaso acumulador e o filtro). Esse é exatamente o esquema de uma geladeira comum, por compressão de vapor.

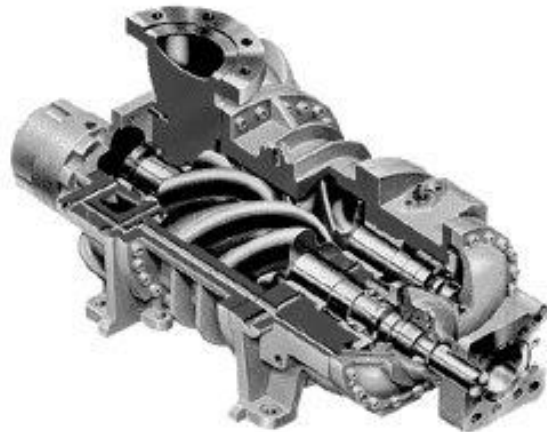
Outras possibilidades de sistemas frigoríficos (geladeiras, condicionadores de ar, resfriadores diretos e indiretos, etc) são as de ciclo de gás (não há mudança de fase), absorção (veremos rapidamente mais à frente) e a de efeito Peltier (há alguma informação sobre o efeito Peltier no texto de temperatura em <http://www.fem.unicamp.br/~instmed>).

Veja um sistema indireto: o ambiente (ou processo) será resfriado ou condicionado por um fluido secundário, isto é, um fluido de transferência que não é o refrigerante com o qual opera o ciclo. No caso, figura abaixo, o fluido de trabalho é resfriado pelo refrigerante no evaporador e “transporta o frio” para o ambiente adequado. Um tal sistema é conhecido no meio técnico como “chiller”, do inglês, isto é, um *resfriador*.



Esquema de um “chiller” de água

Neste chiller mostrado na figura acima, o refrigerante circula do compressor para o condensador, passa pelo vaso acumulador, expande-se na válvula de expansão termostática, evapora-se no evaporador, retirando calor de um fluxo de água. É esta água resfriada que será utilizada no processo para resfriar um ambiente, um produto, um outro fluxo de líquido. Assim, este é um sistema indireto. A figura mostra duas possibilidades para a condensação: condensador resfriado a ar (trocador de tubo aletado, normalmente), ou condensador resfriado a líquido (geralmente um trocador casco-e-tubo - shell and tube). Quando um condensador resfriado com líquido é usado, a maioria das vezes a água é o fluido de resfriamento, e uma torre de refrigeração (para resfriar a água aquecida no condensador, para que possa ser usada em um circuito fechado) é usada. O evaporador do chiller é um casco-e-tubo.



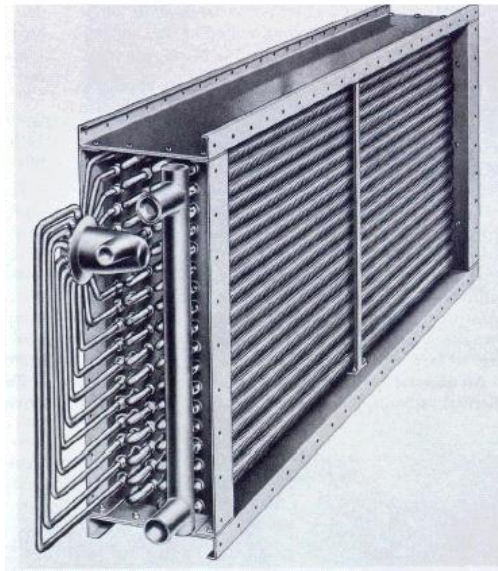
**Compressor**



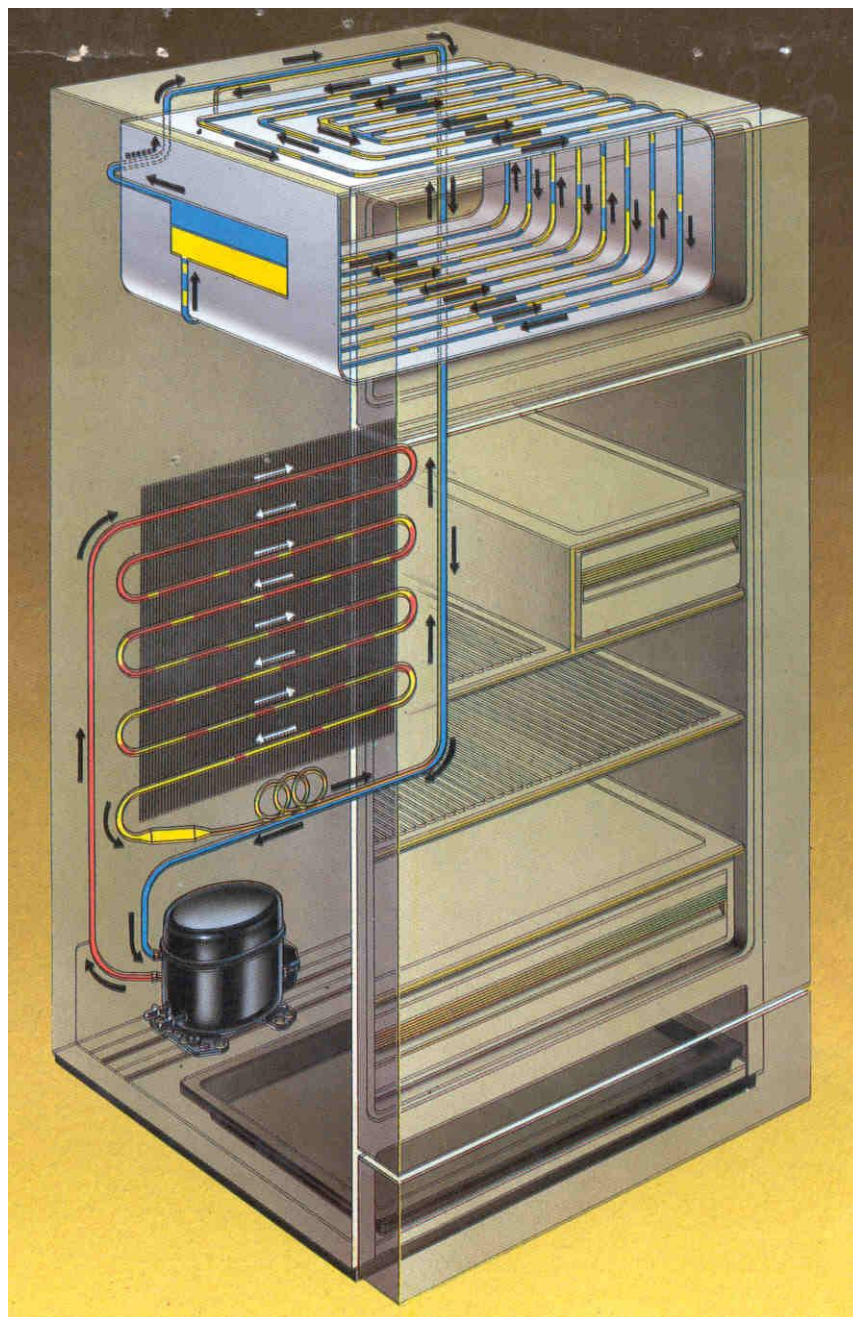
**Condensador a ar remoto**



**Válvulas de Expansão**



**Evaporadores**



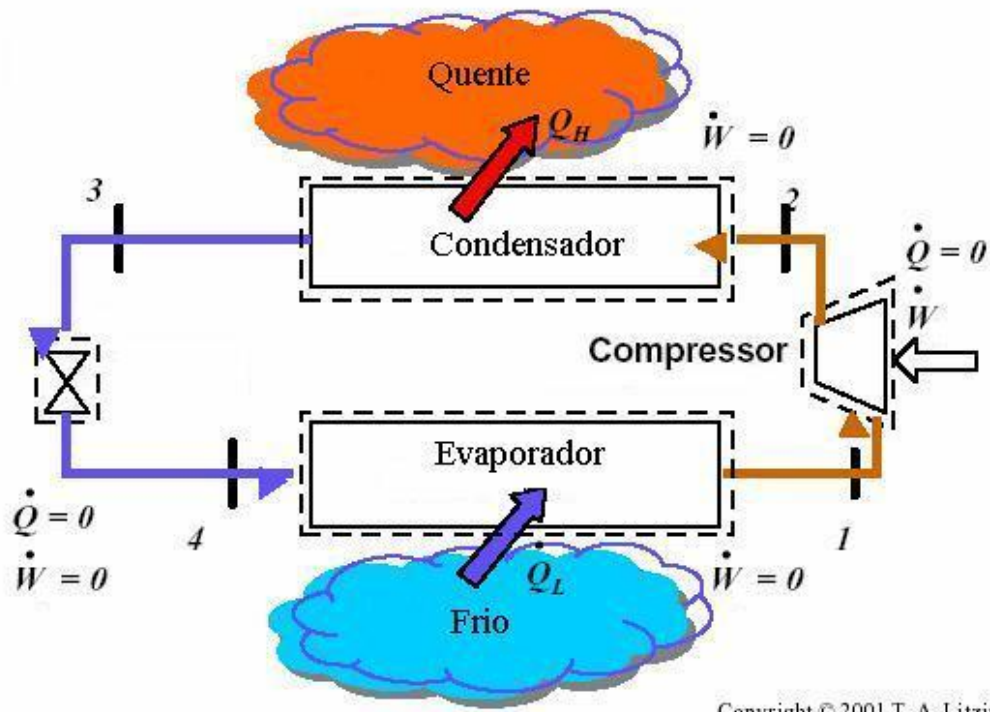
**A geladeira doméstica: um exemplo de ciclo de compressão de vapor**

Mas, efetivamente, o que é o ciclo frigorífico de compressão de vapor? Ele consiste de uma série de processos executados sobre e por um fluido de trabalho, denominado de *refrigerante*. A geladeira da sua casa, por exemplo, e o aparelho de ar condicionado de janela, da sala de aula, ambos devem funcionar com o Refrigerante 22, o mais comum, também conhecido por Freon 22 (em tempo, ciclos de compressão modernos já estão utilizando refrigerantes “ecológicos”, que não afetam a camada de ozônio da atmosfera pois refrigerantes cloro-fluor-carbonados destroem o ozônio  $O_3$  da atmosfera). Assim como o ciclo de compressão de uma geladeira de boteco, o ar-condicionado de seu carro, o sistema de condicionamento central de um edifício, de um “shopping center”, e vários outros, industriais, comerciais e residenciais.

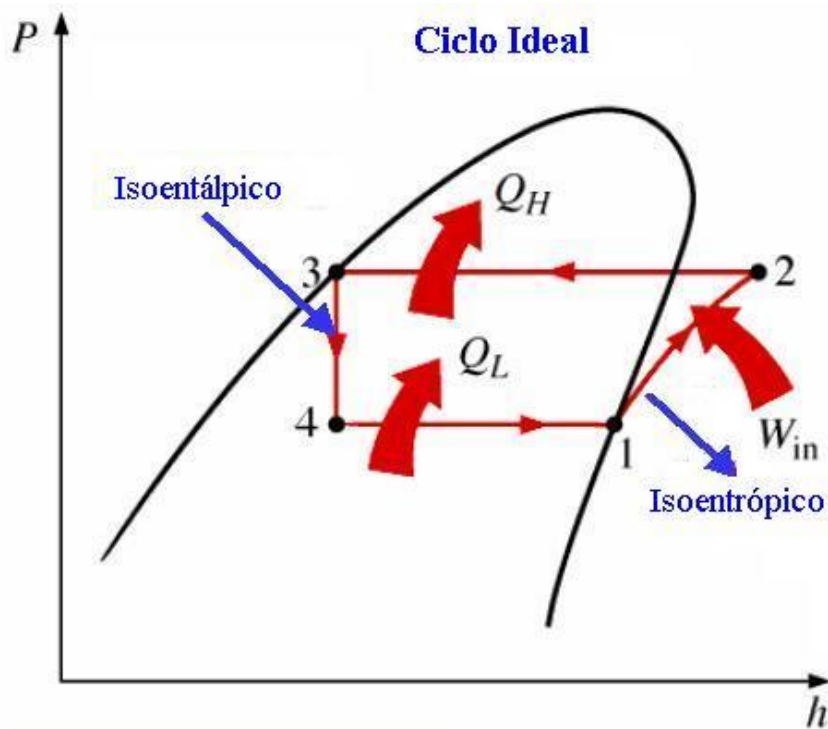
O ciclo é constituído dos seguintes processos:

1. compressão de vapor, isto é, um compressor realiza trabalho sobre o vapor, transfere potência a ele;
2. a condensação do vapor, que ocorre no condensador (o trocador de calor à direita, na figura acima);
3. a expansão do líquido após o condensador, que ocorre na válvula termostática ou em um tubo capilar;
4. a evaporação do líquido no evaporador.

Como em toda análise de ciclos, vamos começar analisando um ciclo ideal de compressão de vapor. Vale lembrar, novamente, que ciclos reais desviam-se dos ciclos idealizados, isto é, o ciclo ideal serve, para nossa análise do ciclo real, como uma referência, um objetivo a atingir (apesar de inalcançável, mas engenheiro tem um quê de alquimista, e segue em frente) , através da melhoria de cada processo que o constitui. Veja então um ciclo ideal de compressão de vapor, na figura seguinte, representado esquematicamente e no diagrama de Mollier (P versus h):



**Representação esquemática do ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor no diagrama de Mollier**



**Ciclo de compressão de vapor ideal no diagrama de Mollier**

O equacionamento do ciclo ideal: seja a formulação simples da Equação da Energia, conforme dada abaixo, aplicável para um sistema em regime permanente, para um escoamento unidimensional com uma entrada e uma saída, isto é,  $m_s = m_e = m$ .

$$\dot{Q} - \dot{W}_{\text{útil}} = \left( h + \frac{1}{2}V^2 + g \cdot \Delta e \right)_s \dot{m}_s - \left( h + \frac{1}{2}V^2 + g \cdot \Delta e \right)_e \dot{m}_e$$

Cada um dos processos que formam o ciclo devem ser analisados separadamente:

### Compressão >> Modelo Ideal do Compressor

No compressor só há um fluxo de entrada e um de saída:  $m_e = m_s = m$ . Vamos desprezar a variação das energias cinética e potencial entre a entrada e saída do compressor; e vamos admitir que o processo de compressão é adiabático e reversível, isto é, é isentrópico, veja a figura. Assim, se o processo ocorre em regime permanente e se  $W$  é o trabalho realizado sobre o VC,

$$\dot{Q} - \dot{W}_{\text{útil}} = \frac{dE_{CV}}{dt} + \left( h + \frac{1}{2}V^2 + g \cdot \Delta e \right)_s \dot{m}_s - \left( h + \frac{1}{2}V^2 + g \cdot \Delta e \right)_e \dot{m}_e$$

$$\dot{W} = (h_2 - h_1) \cdot \dot{m}$$

Os estados, representados por números, 1 e 2, estão na figura.

As propriedades do refrigerante em 2 são conhecidas desde que se fixe a pressão de condensação, pois o processo é isentrópico.

## Condensador e Evaporador >> Modelo Ideal do Condensador e do Evaporador

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_s \left( h_s + \frac{V_s^2}{2} + g\Delta e_s \right) - \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + g\Delta e_e \right)$$

Diagrama de anotações para a equação acima:

- ① aponta para  $\frac{dE_{cv}}{dt}$
- ② aponta para  $\dot{Q}$
- ③ aponta para  $\dot{W}$
- ④ aponta para  $\dot{m}_s$
- ④ aponta para  $h_s$
- ④ aponta para  $\frac{V_s^2}{2}$
- ④ aponta para  $g\Delta e_s$
- ③ aponta para  $\dot{m}_e$
- ④ aponta para  $h_e$
- ④ aponta para  $\frac{V_e^2}{2}$
- ④ aponta para  $g\Delta e_e$

As premissas são:

1. regime permanente;
2. só existe trabalho de escoamento (incluído na entalpia);
3. só existe um fluxo de entrada e um fluxo de saída,  $\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$ ;
4. variações de energia cinética e potencial são desprezíveis frente à variação da entalpia, e
5. a pressão é constante (esta é uma aproximação!).

Assim:

**Condensador ideal:**  $\dot{Q} = (h_3 - h_2)\dot{m}$

**Evaporador ideal:**  $\dot{Q} = (h_1 - h_4)\dot{m}$

## Válvula de Expansão >> Modelo Ideal da Expansão

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} - \sum \dot{m}_s \left( h_e + \frac{V_s^2}{2} + g \Delta e_s \right) + \sum \dot{m} \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + g \Delta e_e \right)$$

①
②
③
⑤
④
③
⑤
④

As premissas são:

1. regime permanente;
2. processo adiabático;
3. só existe um fluxo de entrada e um fluxo de saída,  $m_e = m_s = m$ ;
4. variação de energia potencial é desprezível
5. variação de energia cinética pode ser desprezível.

Assim:

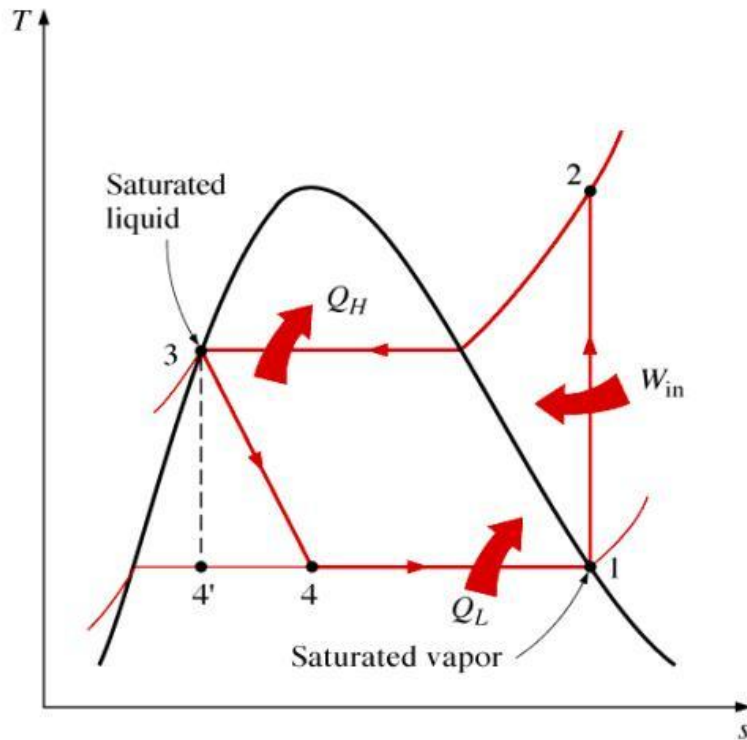
**Expansão ideal:**  $0 = (h_4 - h_3)m$

Isto é,

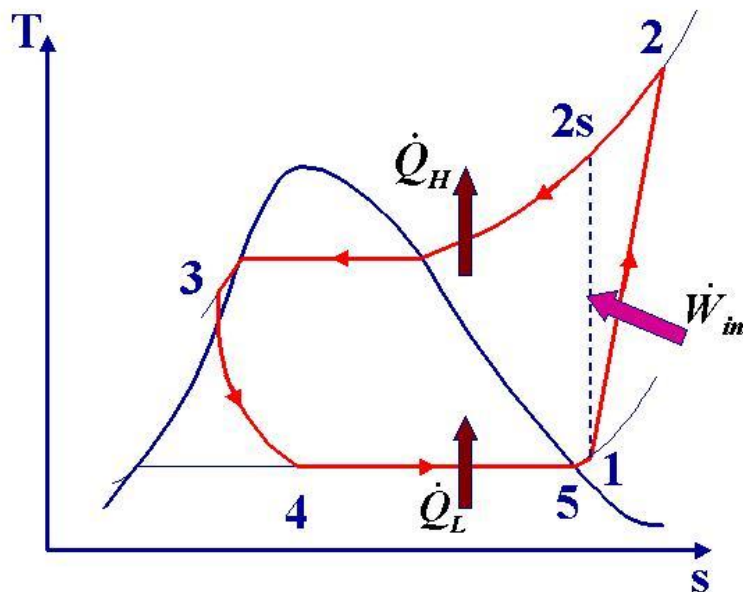
**Evaporador ideal:**  $h_4 = h_3$  (processo isoentálpico!)

Conseqüentemente, é irreversível pois não é isoentrópico (volte ao diagrama de Mollier para verificar): isto é, um processo adiabático isoentálpico não é isoentrópico (e não é reversível)

Representação esquemática do ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor no diagrama  $T$  versus  $s$ .

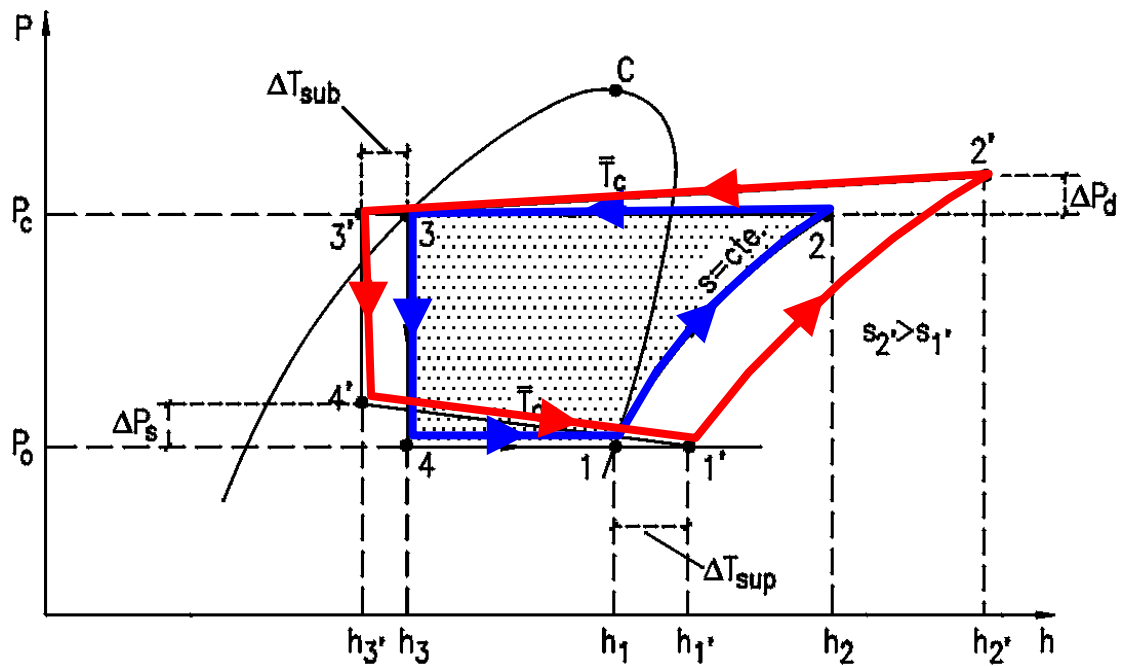


Ciclo ideal de compressão de vapor, diagrama  $T$  x  $s$



Ciclo real de compressão de vapor, diagrama  $T$  x  $s$

Diferenças entre os ciclos ideal e real de refrigeração por compressão de vapor no diagrama  $P$  versus  $h$  (Mollier).



Em um ciclo de refrigeração, o objetivo é a remoção de calor do ambiente a ser refrigerado. Assim, seu **COP – Coeficiente de Performance**, isto é, *Coeficient of Performance*, é definido como sendo a razão entre o calor retirado e o trabalho realizado:\

$$COP = \frac{Q_L}{W}$$

Idealmente,

$$COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

O COP depende:

1. da temperatura de evaporação (vaporização);
2. da temperatura de condensação
3. propriedades (*funções de estado*) do refrigerante na sucção do compressor, e
4. de todos os componentes do sistema: compressor, condensador, etc, etc.

## Refrigeradores Domésticos

O refrigerador doméstico é hoje, sem dúvida, o mais importante entre os eletrodomésticos. Refrigeradores domésticos, as populares geladeiras e “freezers” são sempre máquinas frigoríficas por compressão de vapor, e o R-12 é ainda o refrigerante mais utilizado, apesar de que, a partir do Protocolo de Montreal, de 1990, tem sido progressivamente substituído por R134a, R600 (n-butane), R600a (iso-butane) ou R600b (cyclopentane). Os refrigerantes hidrocarbonetos “modernos”, butano e pentano, têm pressão de vapor mais baixa que os Freon e o R134, fazendo com que a pressão no evaporador esteja abaixo da atmosférica, vácuo, algum valor por volta de 58 kPa., veja tabela abaixo.

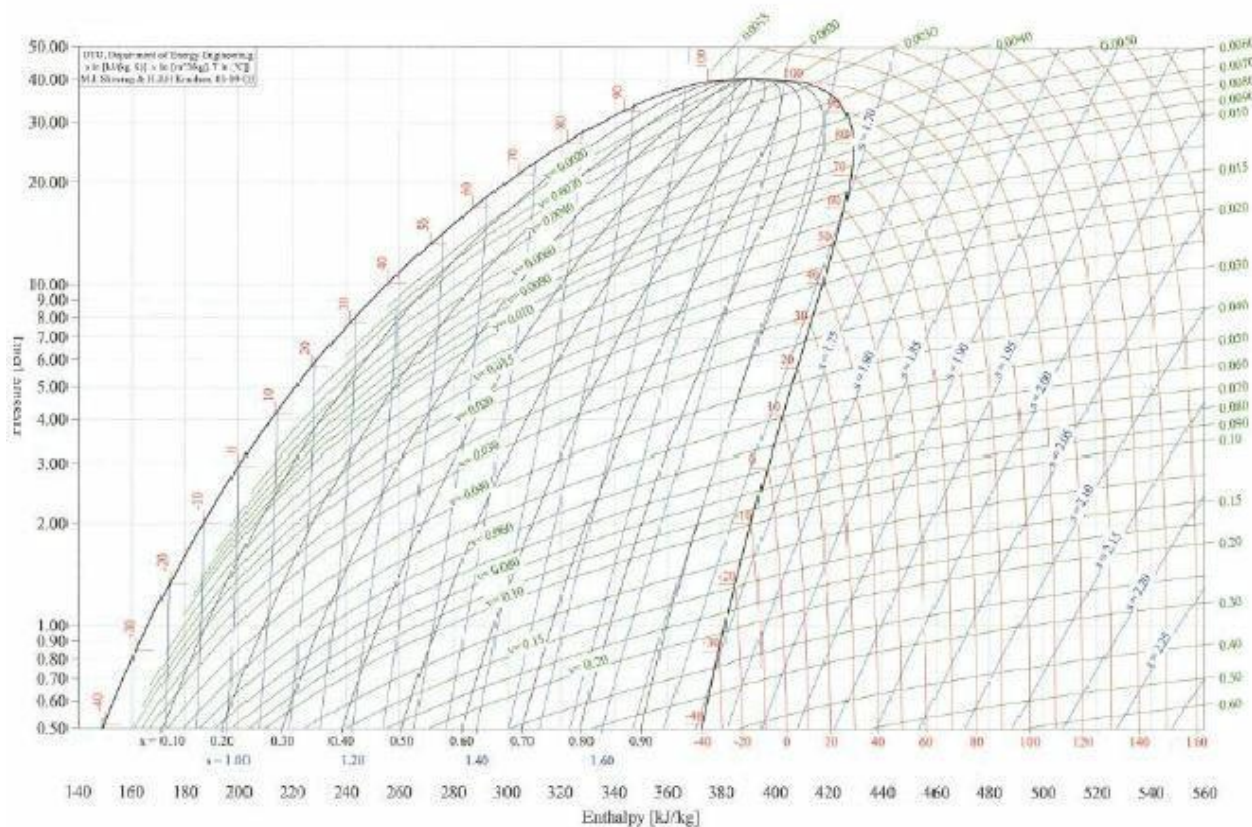
Table 3. Propriedades de refrigerantes de uso doméstico

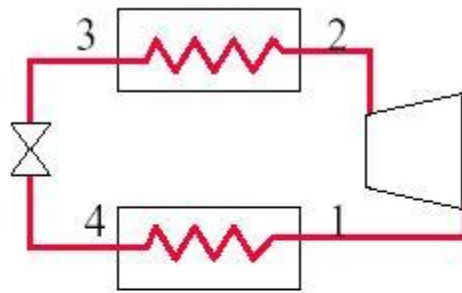
Refrigerante	R12	R134a	R600a
Nome, fórmula	Dicloro-difluorometano, $\text{CCl}_2\text{F}_2$	1,1,1,2-tetrafluoroetano, $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$	Iso-butano, $\text{CH}_3)_3\text{CH}$
Massa molar [kg/mol]	0.121	0.102	0.058
Temperatura ebulição [K]	243.2	246.6	261.5
Temperatura Crítica [K]	388	374	408
Pressão Crítica [MPa]	4.01	4.07	3.65
Densidade a 25 °C [kg/m <sup>3</sup> ]	1470	1370	600
Pressão vapor a 25 °C [kPa]	124	107	58
Enthalpia vaporização a 25 °C [kJ/kg]	163	216	376

## Exemplo de cálculo de ciclo de refrigeração:

Um sistema de refrigeração por compressão de vapor opera com Freon-12. A vazão mássica do sistema operando em condição de regime permanente é de 6 kg/min. O Freon entra no compressor como vapor saturado a 1,5 bar, e sai a 7 bar. Assuma que o compressor tem rendimento isoentrópico de 70%. O condensador é do tipo tubo aletado, resfriado com o ar ambiente. Na saída do condensador o Freon está como líquido saturado. A temperatura da câmara frigorífica é  $-10^{\circ}\text{C}$  e a temperatura ambiente é  $22^{\circ}\text{C}$ . Considere que as trocas de calor no sistema ocorram somente no evaporador e no condensador, e que evaporação e condensação ocorram sob pressão constante. Pede-se:

- 1- a representação dos processos termodinâmicos do ciclo nos diagramas  $P \times h$  e  $T \times s$ ;
- 2- A eficiência de Carnot deste ciclo;
- 3- O COP do ciclo;
- 4- A capacidade de refrigeração do ciclo;
- 5- O rendimento exergético do ciclo.



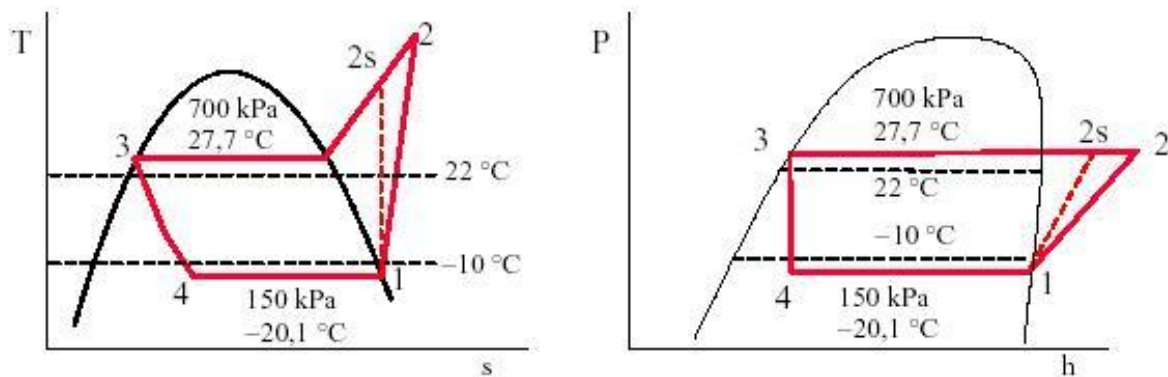


Estado	$P$ (kPa)	$T$ (°C)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg K)	$x$
1	<b>150</b>	-20,1	179,07	0,7103	<b>1</b>
2s	<b>700</b>		206,24	<b>0,7103</b>	-
2	<b>700</b>		217,88		-
3	<b>700</b>	27,7	62,24		<b>0</b>
4	<b>150</b>	-20,1	<b>62,24</b>		

Notar que  $h_{2s}$  é facilmente obtido se a compressão é isoentrópica. E que  $h_2$  é calculado sabendo-se a eficiência do processo de compressão. Assim,

$$h_2 = h_1 + (h_{2s} - h_1)/0,7 = 217,88 \text{ [kJ/kg]}$$

### 1. a representação dos processos termodinâmicos:



### 2. a eficiência de Carnot, $COP_c$ :

$$COP_c = \frac{\dot{Q}_f}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_f}{\dot{Q}_q - \dot{Q}_f} = \frac{\dot{Q}_f}{T_q - T_f} = \frac{263}{32} = 8,22$$

**3. a eficiência do ciclo, COP:**

$$COP_c = \frac{\dot{Q}_f}{\dot{W}} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_4)}{\dot{m}(h_2 - h_1)} = \frac{179,07 - 62,24}{217,88 - 179,07} = \frac{116,83}{38,81} = 3,01$$

**4. a capacidade de refrigeração, em kW:**

$$\dot{Q}_f = \dot{m}(h_1 - h_4) = \left(\frac{6}{60}\right) \left[\frac{kg}{s}\right] (116,83) \left[\frac{kJ}{kg}\right] = 11,68 kW$$

### Exercícios sugeridos:

1. Um ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor opera com Freon 12. As temperaturas fria e quente são, respectivamente, 20 °C e 40 °C (câmara frigorífica e ambiente, no caso, estão à temperatura de evaporação e condensação, o que é teórico, evidentemente). O refrigerante entra no compressor como vapor saturado a 20 °C e sai do condensador como líquido saturado a 40 °C. O fluxo mássico é 0,008 kg/s. Calcular a potência do compressor, a capacidade de refrigeração em TR (toneladas de refrigeração), a eficiência do ciclo e sua eficiência de Carnot. Respostas: 0,0747 kW; 0,277 TR; 13,03; 14,65.
2. Altere as temperaturas de evaporação e condensação dadas no problema 1, de forma a se ter um processo que se aproxime mais de um processo real. Considere que a temperatura de evaporação é, agora, 12 °C. E a pressão de condensação é 1,4 Mpa. Calcular a potência do compressor, a capacidade de refrigeração em TR e a nova eficiência do ciclo. Solução: 0,16 kW, 0,23 TR e 5.
3. Recalcular o ciclo do problema 2, mas considerando agora que a eficiência isoentrópica do compressor é 80% e que o líquido sai do condensador a 48 °C. Solução: 0,20 kW, 0,25 TR e 4,35.