



Termodinâmica e Estrutura da Matéria

Aula 15 – Ciclo frigorífico

Carlos A. Santos Silva

Professor Associado Convidado

Cátedra WS – Energia

Departamento de Física

carlos.santos.silva@tecnico.ulisboa.pt



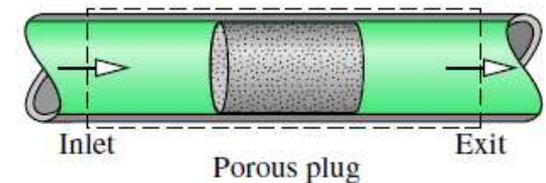
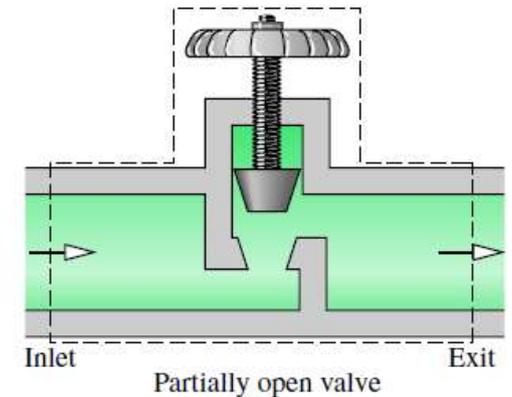
Sumário

- Refrigeração
- Ciclo frigorífico de compressão
- Ciclo de frigorífico a gás
- Ciclo de absorção

REVISÃO DE CONCEITOS

Válvulas

- É um dispositivo que restringem o caudal e que induzem grandes perdas de pressão no fluido
 - Válvulas, tubos capilares
- Características
 - $\Delta\dot{Q} \cong 0$: em geral são pequenos dispositivos e podem ser considerados adiabáticos
 - $\Delta\dot{W} = 0$: a queda de pressão não é por aplicação de força em peças moveis
 - $\Delta p_e \cong 0$: em geral estes componentes estão colocados à mesma altura de elevação
 - $\Delta k_e \cong 0$: apesar da velocidade de saída ser muito superior à de entrada, pode em geral ser negligenciada
 - Se não for gás ideal ($h=h(T)$), a alteração da pressão pode ser acompanhada também por uma alteração da temperatura: coeficiente Joule-Thomson



$$h_{in} = h_{out}$$

$$u_{in} + Pv_{in} = u_{out} + Pv_{out}$$

REFRIGERAÇÃO

Definição

- Área da termodinâmica em que existe transferência de calor de uma região a temperatura baixa para outra com temperatura superior
- Dispositivos de refrigeração são:
 - Frigoríficos
 - *Bombas de calor*
 - Ar condicionados, chiller, etc...
- Ciclos de refrigeração
 - Compressão
 - Gás
 - Absorção
- Fluido de trabalho
 - Frigorogénio / *refrigerante*

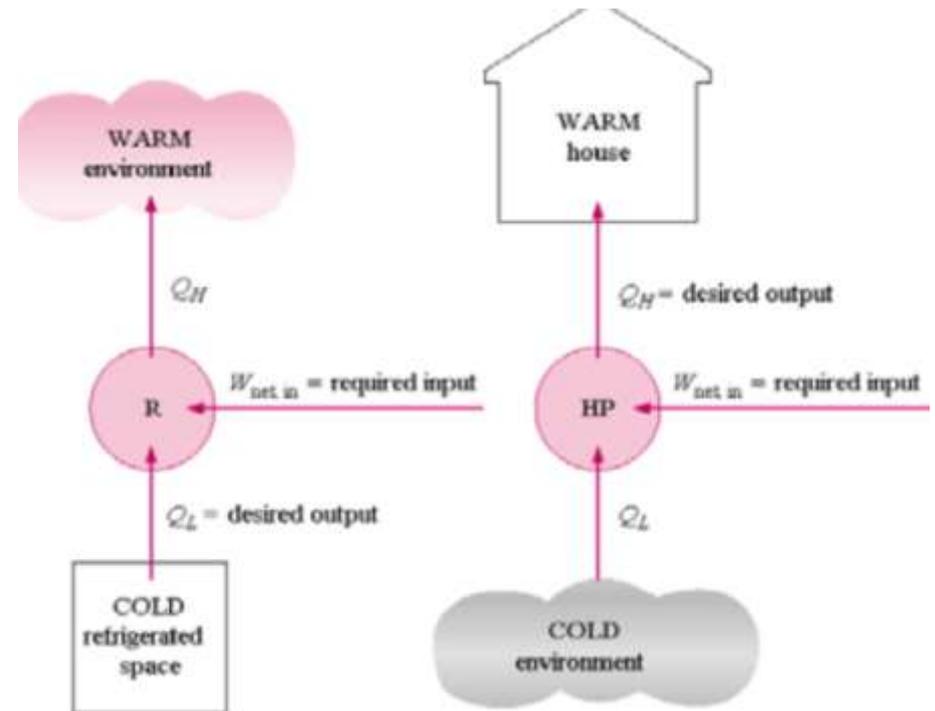
Aplicações

- Conservação de alimentos / medicamentos
- Transporte de alimentos / medicamentos
- Climatização



Bomba de calor e Frigoríficos

- Máquinas que transferem calor de um sistema a uma temperatura inferior para outro sistema a uma temperatura superior através do consumo de trabalho
 - Bomba de calor: manter um sistema quente
 - Frigorífico: manter um sistema frio



Eficiência da bomba de calor e frigorífico

- A eficiência de uma bomba de calor é

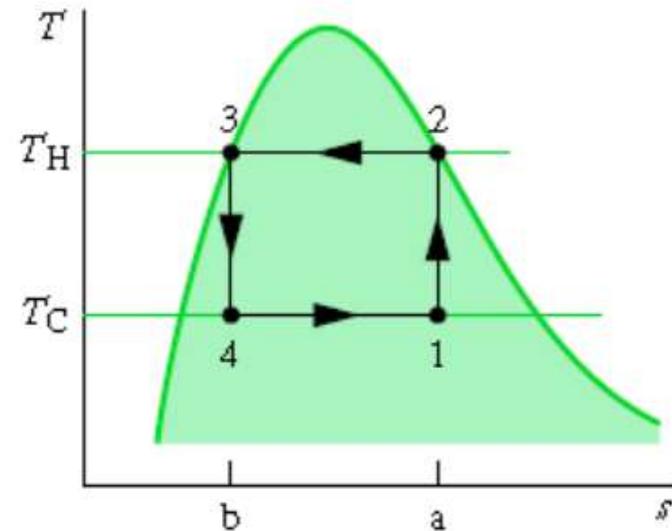
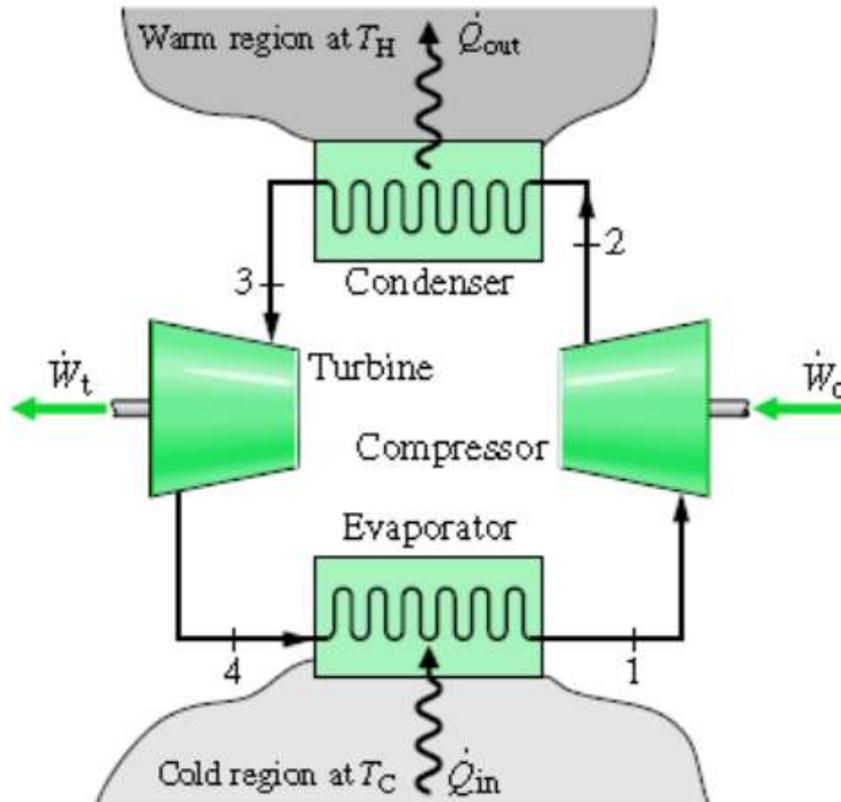
$$COP_{BC} = \frac{Q_H}{W_{ciclo}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C}$$

$$COP_{BC} = 1 + COP_F$$

- A eficiência de um frigorífico é

$$COP_F = EER = \frac{Q_C}{W_{ciclo}} = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C}$$

Ciclo de Carnot reversível



$$COP_{F,carnot} = \frac{1}{T_H/T_C - 1}$$

$$COP_{BC,carnot} = \frac{1}{1 - T_C/T_H}$$

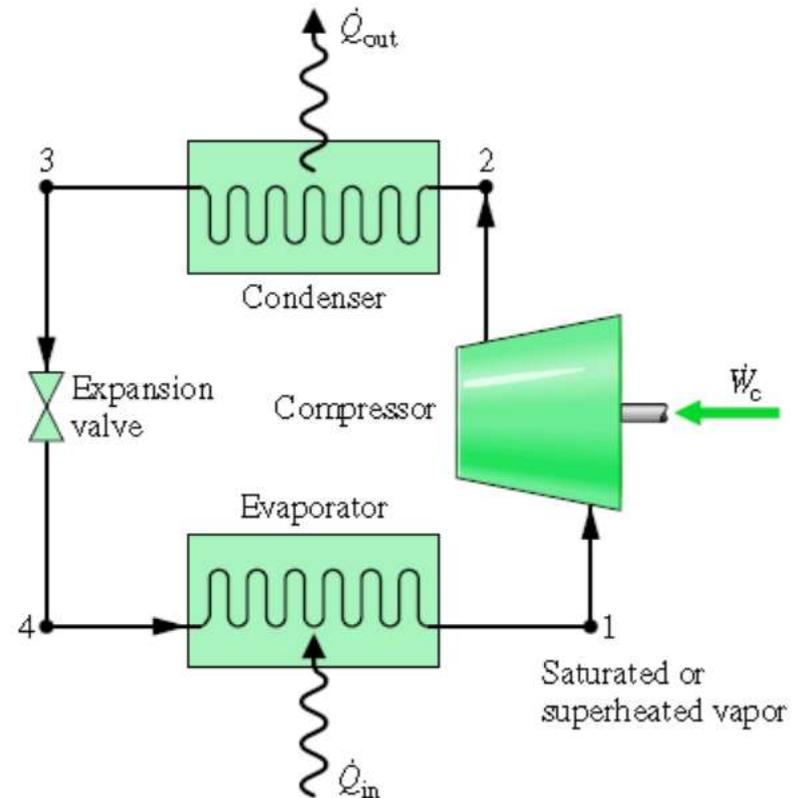
Ciclo de Carnot como ciclo frigorífico

- Ciclo de Carnot não é um bom modelo teórico para ciclos de refrigeração
 - Processos isotérmicos podem ocorrer na transição de fase (condensadores e evaporadores)
 - A compressão de mistura não é exequível
 - A turbinagem com alta concentração de líquido também não é exequível (com baixa concentração já é..)

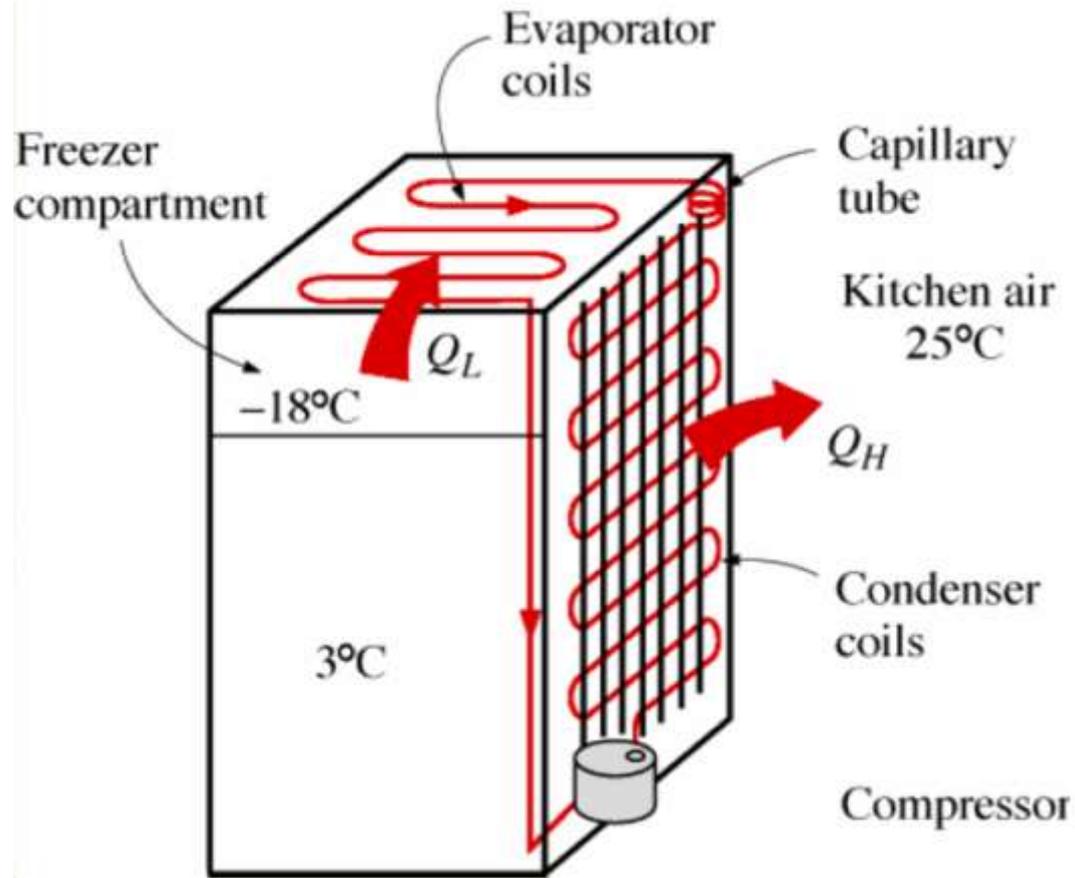
CICLO FRIGORÍFICO DE COMPRESSÃO (DE VAPOR)

Ciclo frigorífico de compressão

- Substituir a turbina por uma válvula de expansão
 - 1→2: compressão isentrópica
 - 2→3: perda de calor a pressão constante (condensador)
 - 3→4: expansão (válvula)
 - 4→1: absorção de calor a pressão constante (evaporador)



Frigorífico



Análise do Ciclo frigorífico de compressão

- 1→2: compressão isentrópica

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = h_2 - h_1$$

- 2→3: compressão isobárica

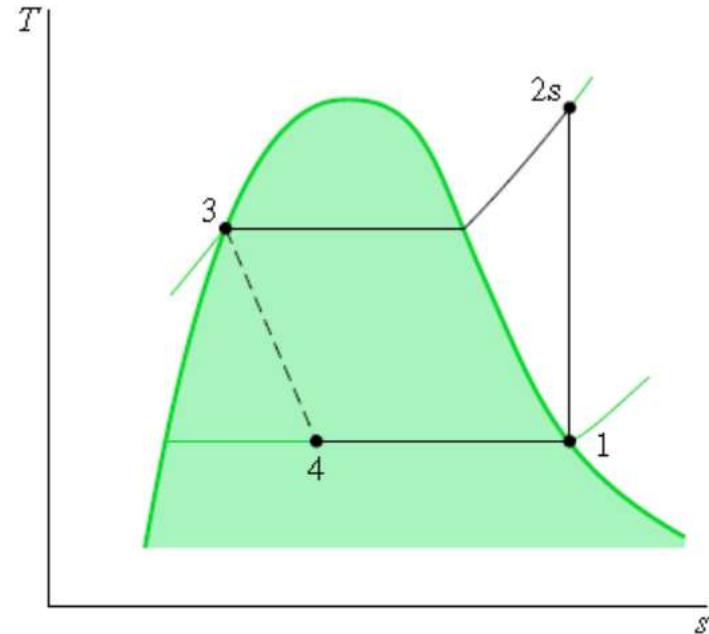
$$\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} = h_2 - h_3$$

- 3→4: expansão

$$h_4 = h_3$$

- 4→1: expansão isobárica

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_1 - h_4$$

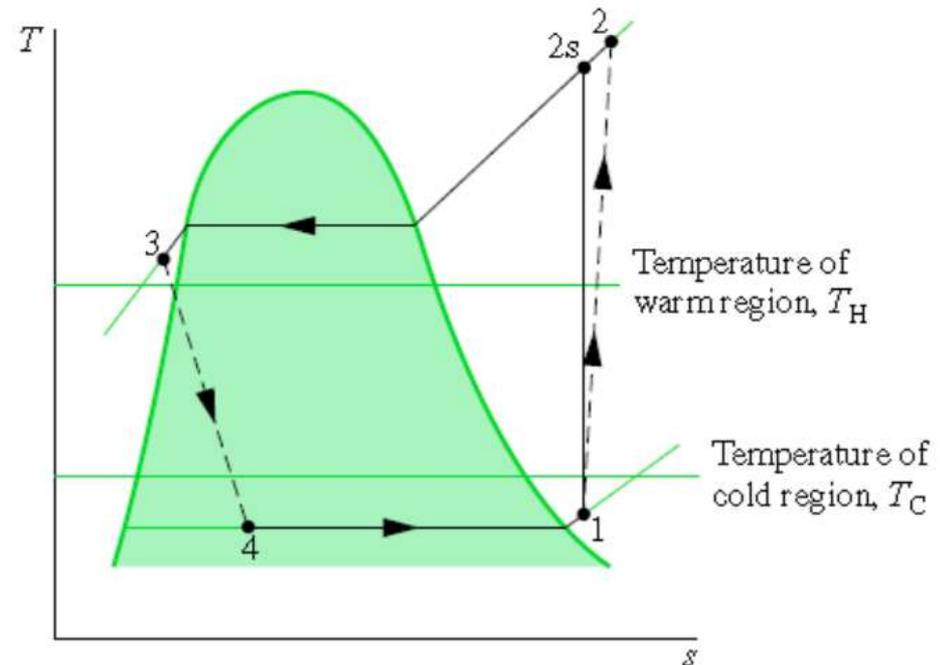


$$COP_F = \frac{Q_C}{W_{ciclo}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

$$COP_{BC} = \frac{Q_H}{W_{ciclo}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

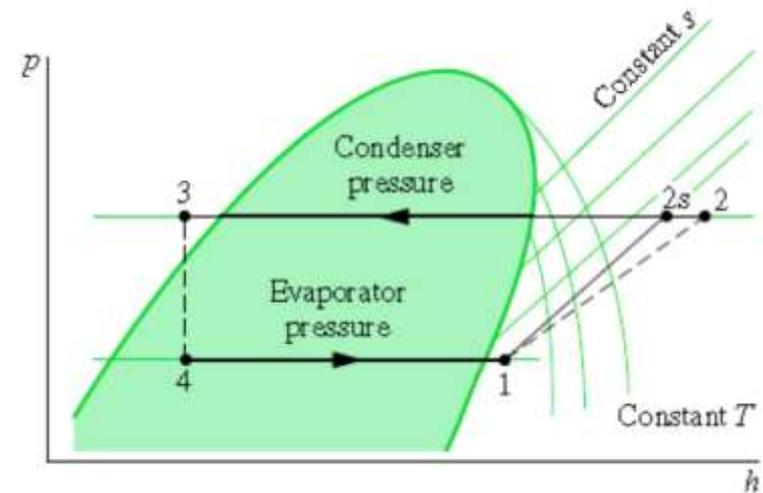
Ciclo Real

- Como as trocas de calor no evaporador e condensador não são reversíveis
 - O fluido tem de atingir um temperatura inferior à do evaporador
 - O fluido tem de atingir uma temperatura superior à do condensador



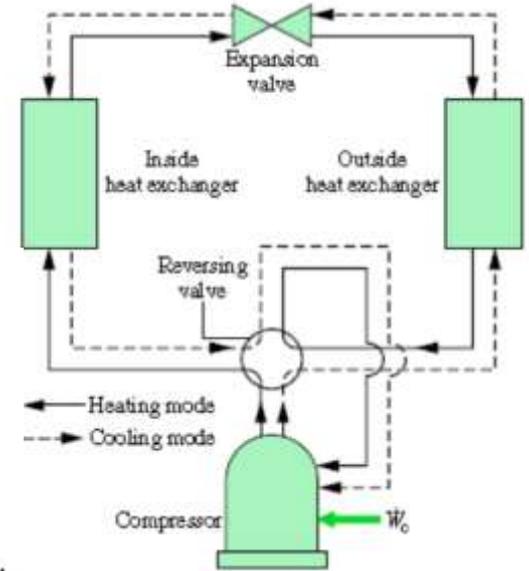
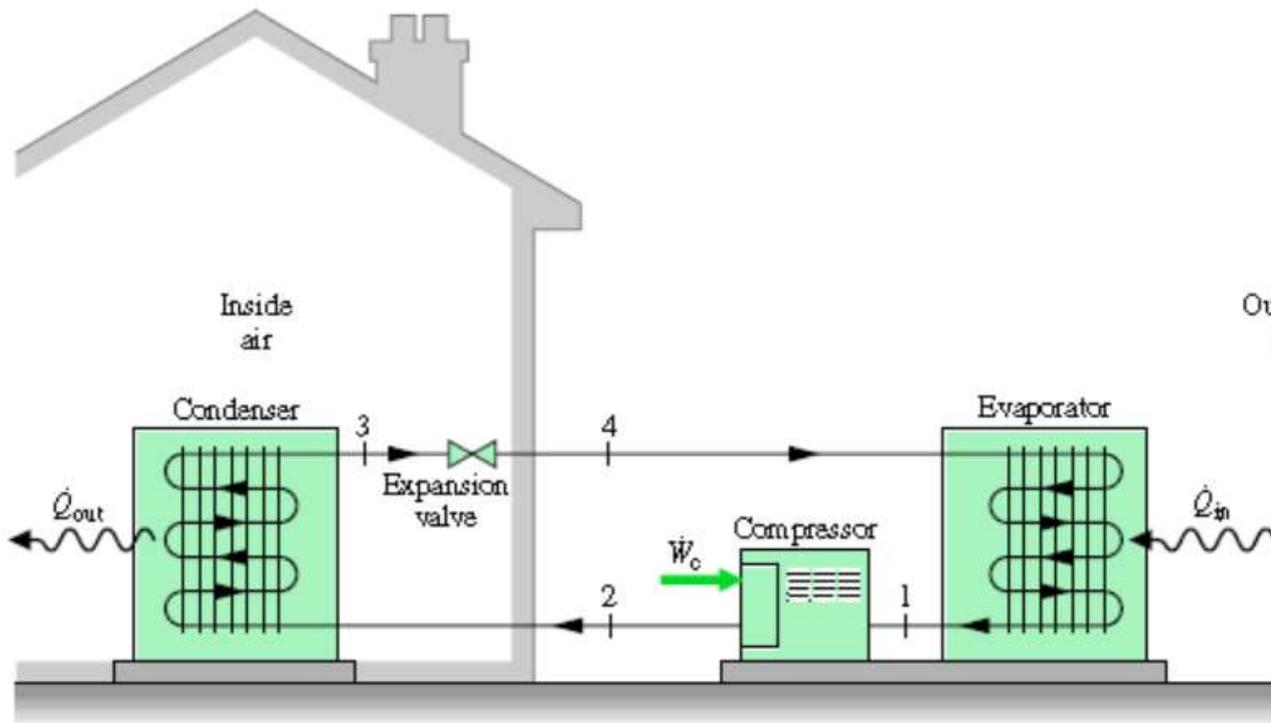
Propriedades dos fluídos frigorígenos

- Na era da industrialização dos frigoríficos (1940's a 1990's), os principais fluídos frigorogénios eram os *clorofluorocarbonetos*
 - R 12 (CCl_2F_2)
- Por causa da camada de ozono, hoje em dia usam-se outros *fluorocarbonos*
 - R 134a (CF_3CC)
 - R 22 (CHClF_2)
- Também se utiliza muito
 - Amoníaco (NH_3) [Tóxico]



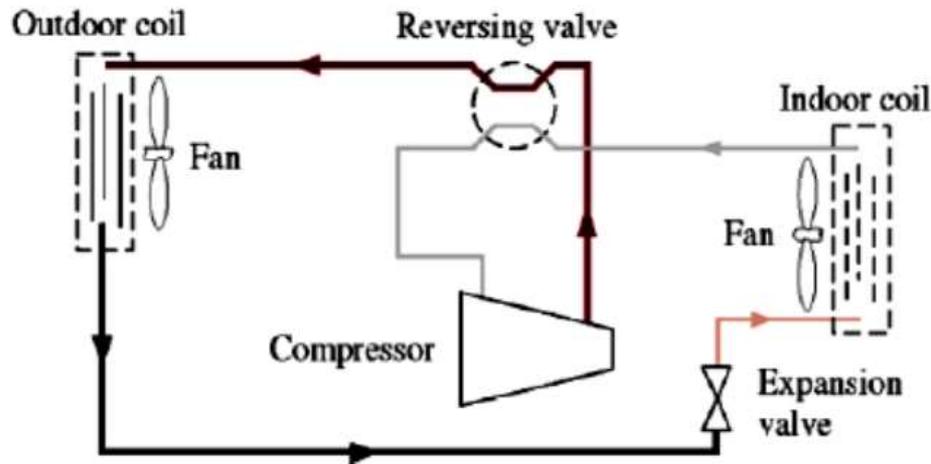
A escolha do refrigerante depende das condições de funcionamento

Bomba de Calor

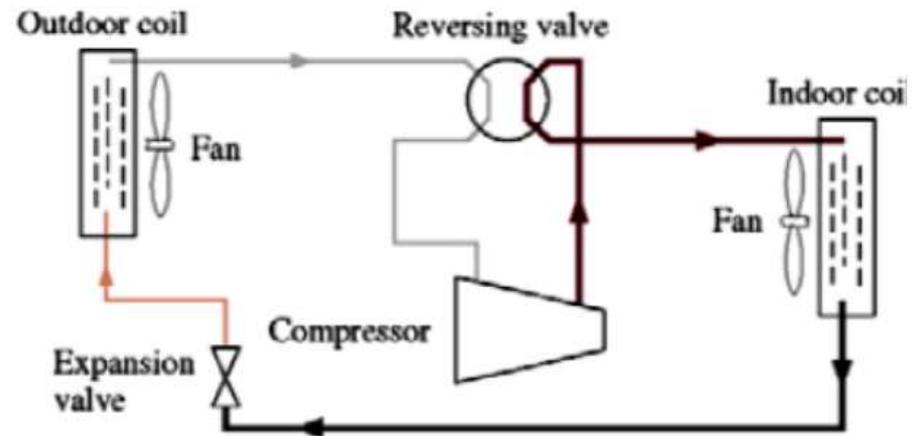


Ar condicionado

HEAT PUMP OPERATION – COOLING MODE



HEAT PUMP OPERATION – HEATING MODE

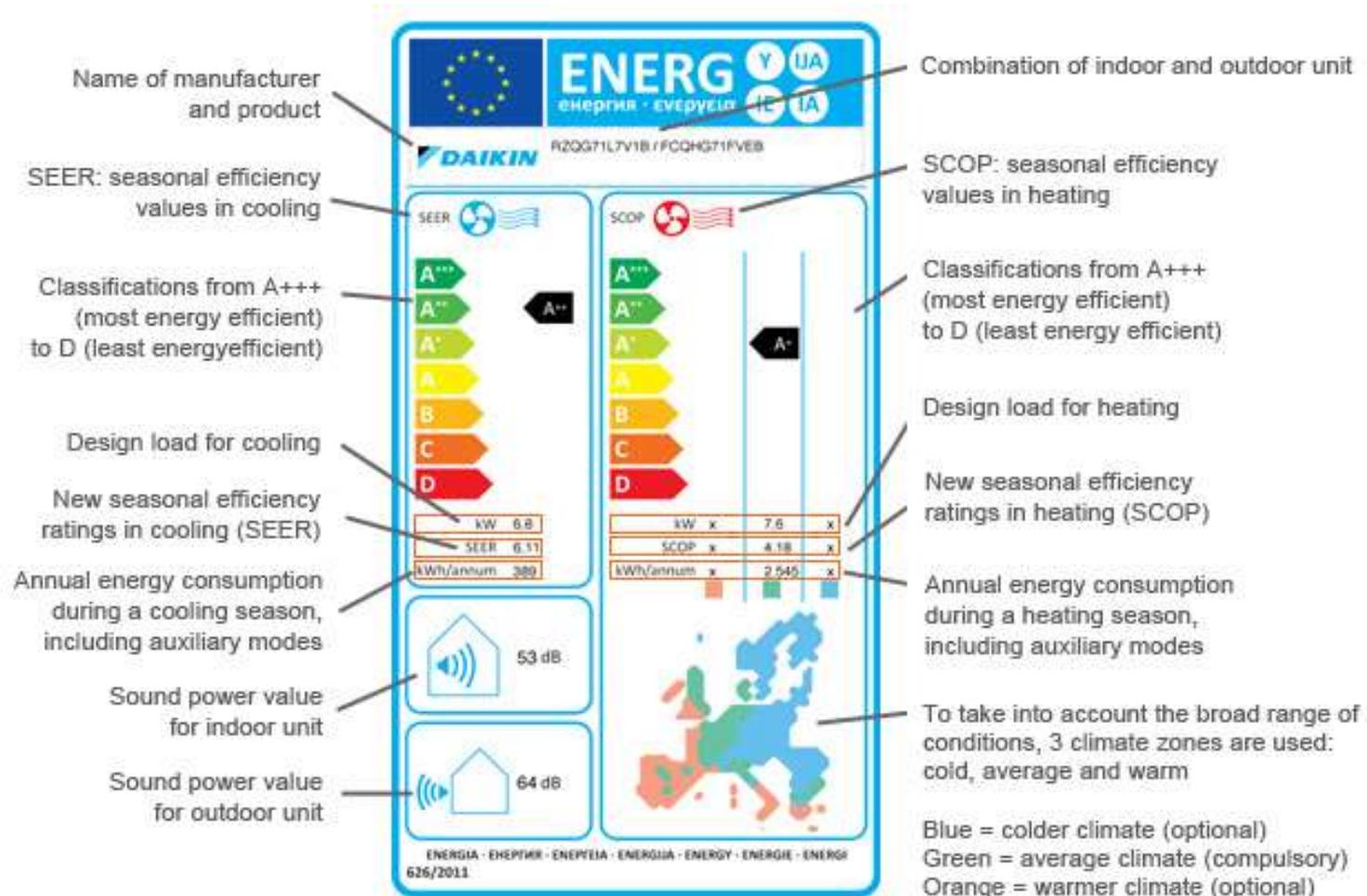


-  High-pressure liquid
-  Low-pressure liquid–vapor
-  Low-pressure vapor
-  High-pressure vapor

Rotulagem energética (Frigorífico)



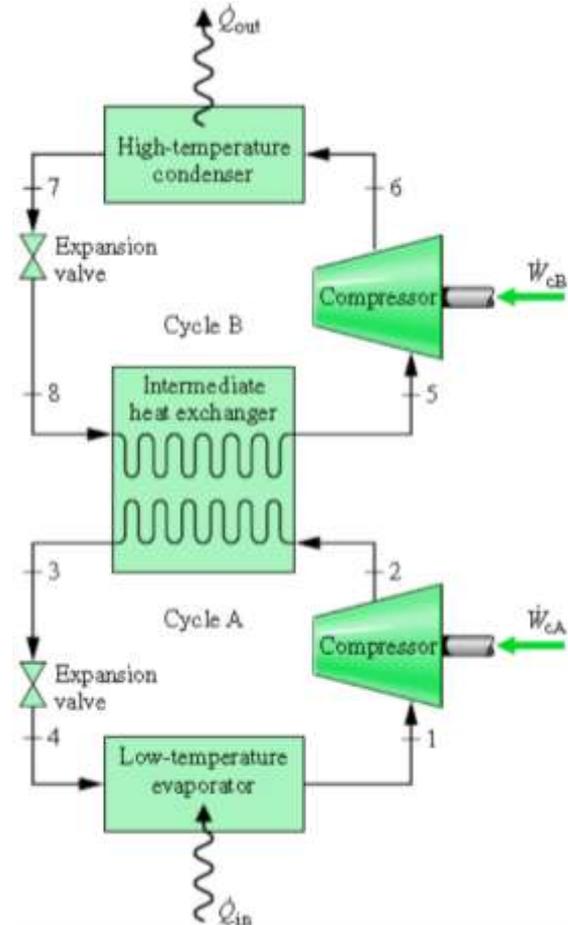
Rotulagem Energética (Ar condicionado)



OTIMIZAÇÃO

Ciclos em Cascata

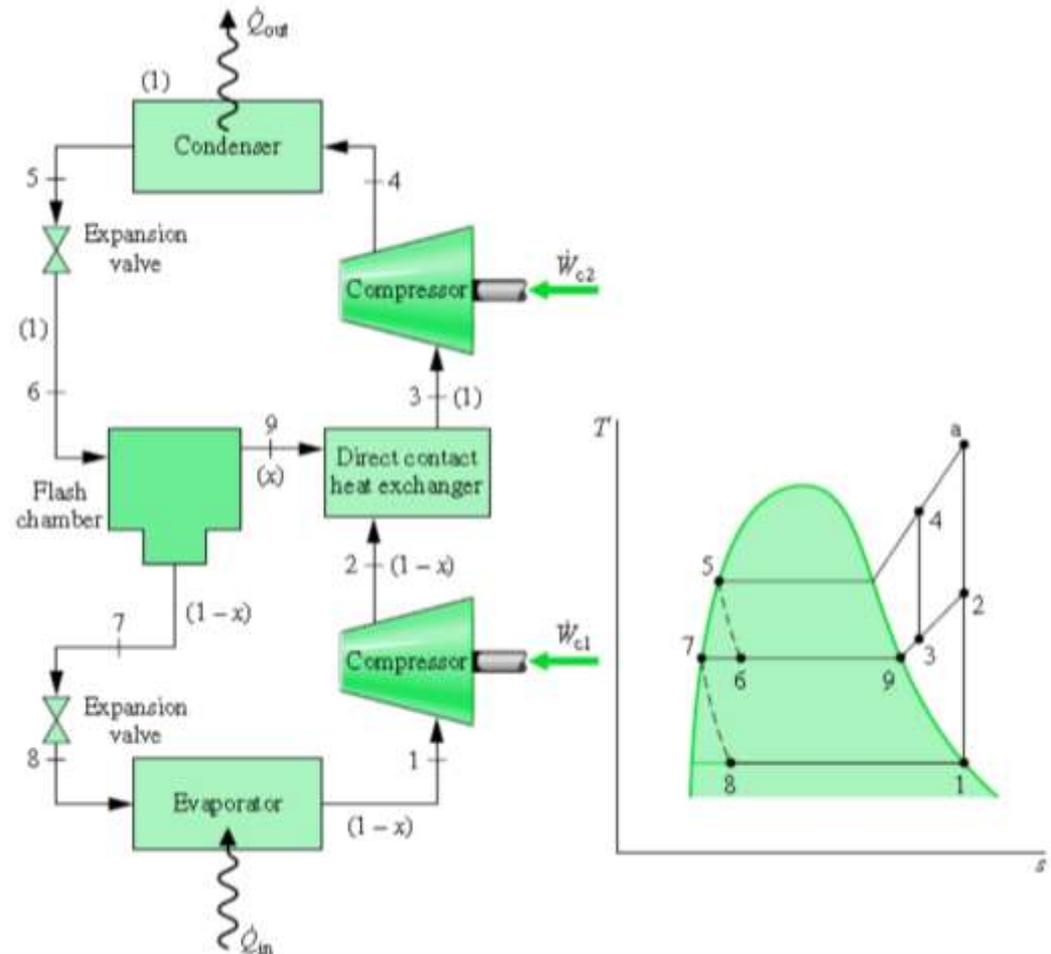
- Em algumas aplicações (sobretudo industriais) onde a diferença de temperatura é muito elevada, pode ser necessário:
 - a compressão em duas etapas
 - utilizar dois fluídos refrigerantes



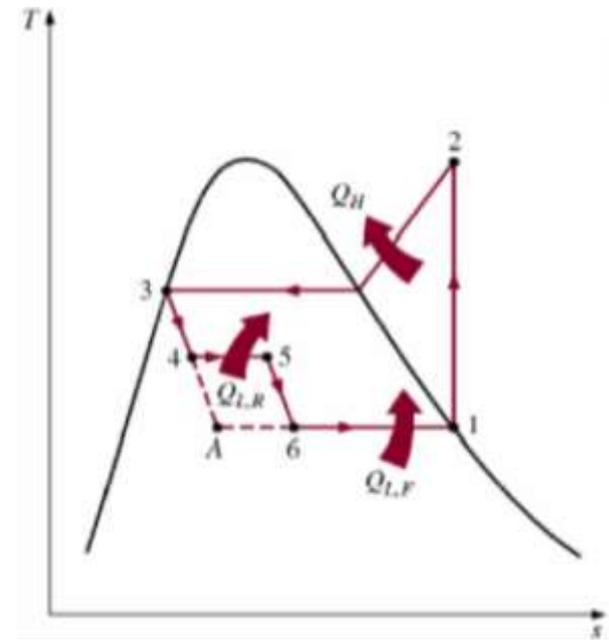
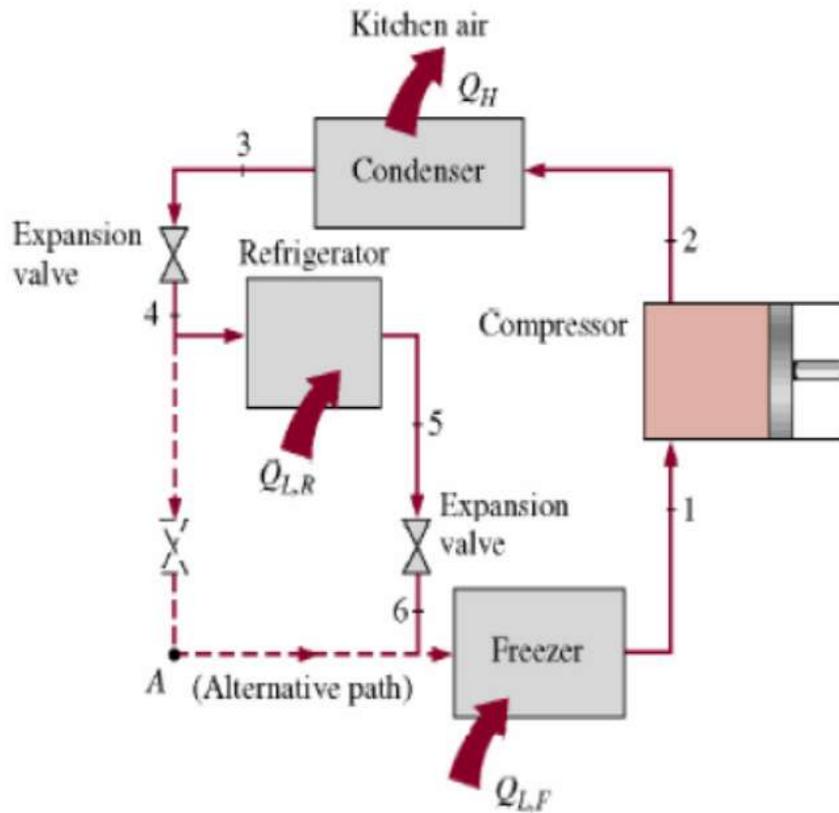
$$COP_F = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}_A + \dot{W}_B} = \frac{\dot{m}_B (h_1 - h_4)}{\dot{m}_A (h_6 - h_5) + \dot{m}_B (h_2 - h_1)}$$

Compressão em múltiplos estágios com intercooling

- Para reduzir o trabalho dos compressores, pode-se utilizar intercooling
 - Câmara de mistura



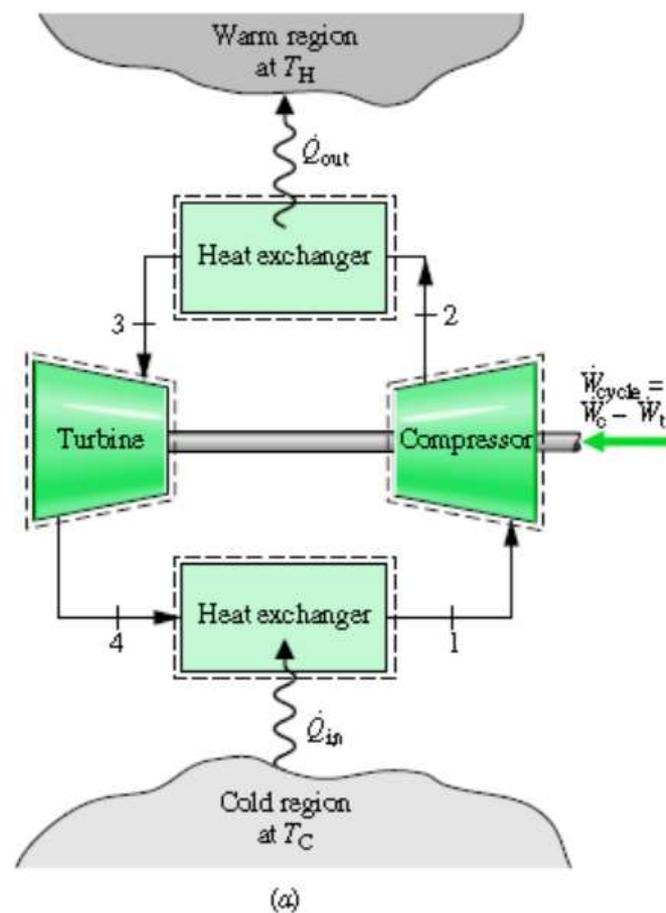
“Combinado”



CICLOS DE REFRIGERAÇÃO A GÁS

Ciclos de refrigeração a gás

- Componentes mais simples e elevados
- Adequados para a liquefação de gases e aplicações criogénicas
 - O líquido refrigerante pode ser o ar



Análise do ciclo

- 1→2: compressão isentrópica

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = h_2 - h_1$$

- 2→3: compressão isobárica

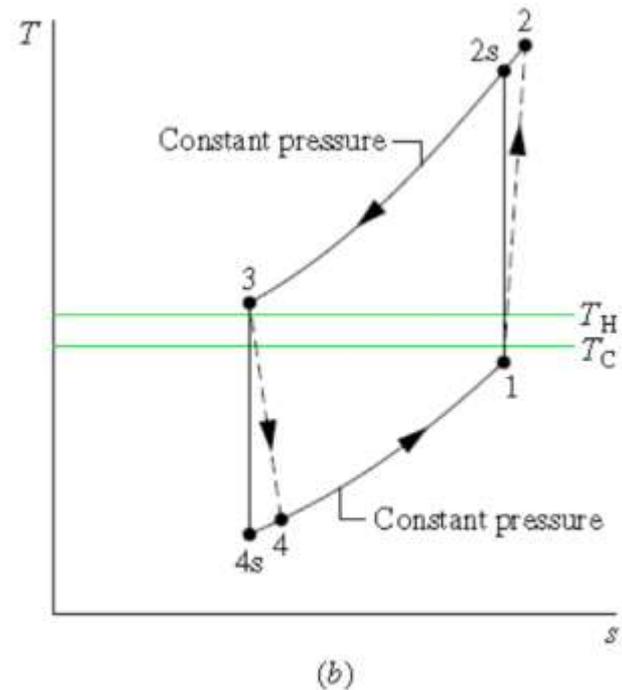
$$\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} = h_2 - h_3$$

- 3→4: expansão isentrópica

$$\frac{\dot{W}_{turbina}}{\dot{m}} = h_3 - h_4$$

- 4→1: expansão isobárica

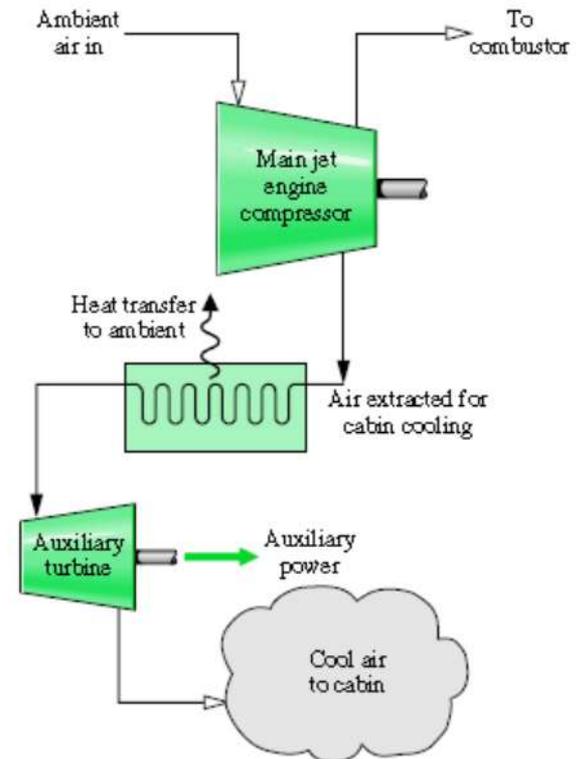
$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_1 - h_4$$



$$\begin{aligned} COP_F &= \frac{Q_c}{W_{ciclo}} = \frac{Q_c}{W_{comp} - W_{turbina}} \\ &= \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_1) - (h_3 - h_4)} \end{aligned}$$

Ar condicionados em aviões

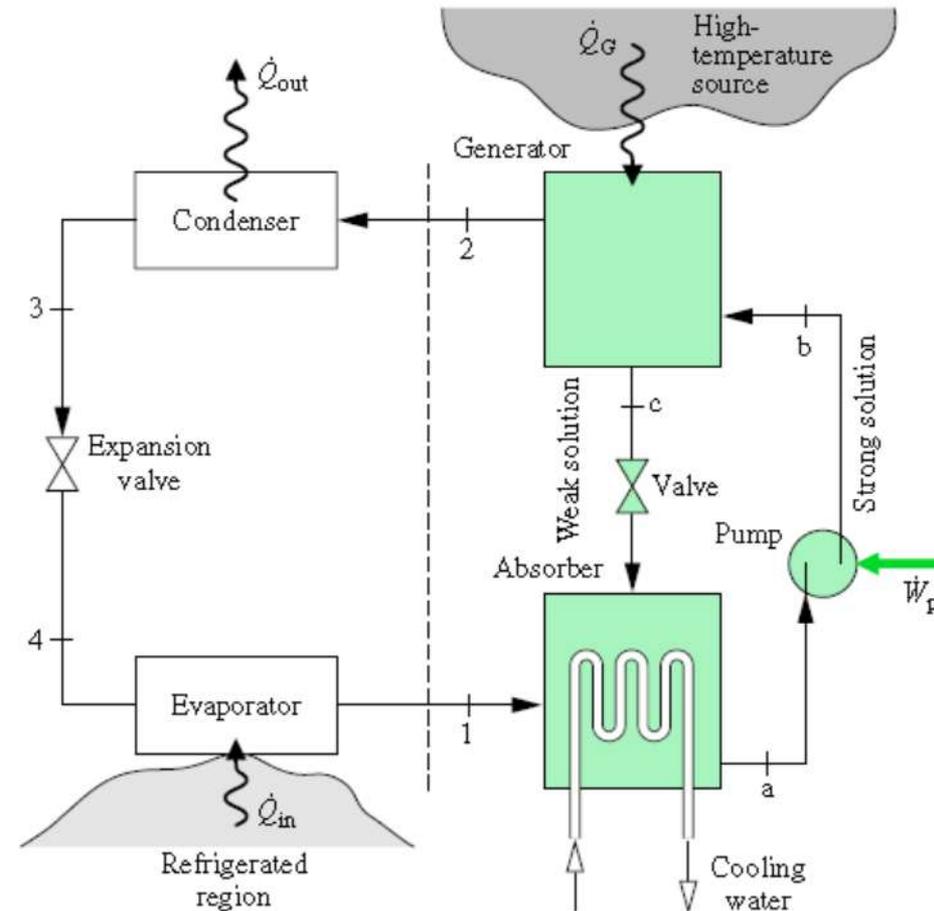
1. Ar extraído do motor após a compressão e antes da câmara de combustão
2. Ar é arrefecido à temperatura ambiente (baixa)
3. Ar é turbinado e expandido à pressão atmosférica para entrar na cabine (produz trabalho para sistemas auxiliares)
4. O ar expandido tem temperatura mais baixa, logo é insuflado na cabine para arrefecê-la



CICLO FRIGORÍFICO DE ABSORÇÃO (DE VAPOR)

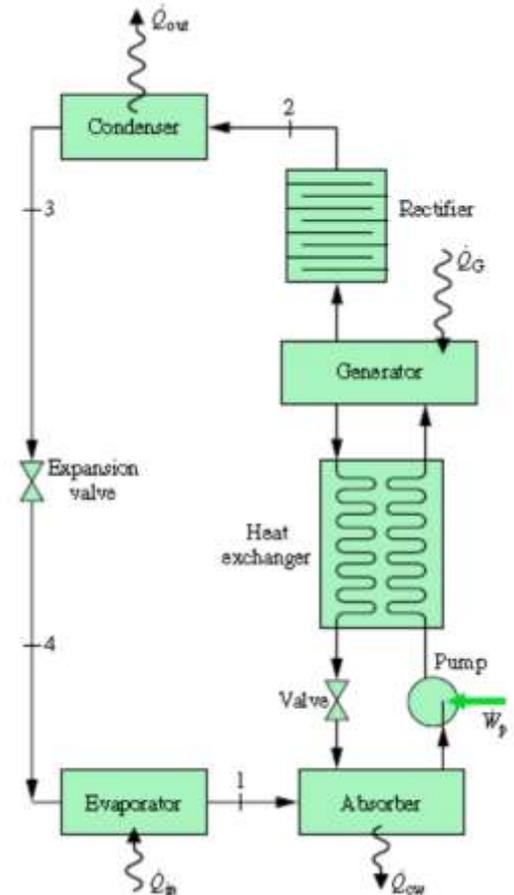
Eliminar o compressor

1. O calor do líquido refrigerante é absorvido por um “**Absorvedor**” até voltar a líquido
2. O líquido é bombeado até à pressão superior
3. O líquido é vaporizado no **Gerador**, que utiliza calor de uma fonte quente



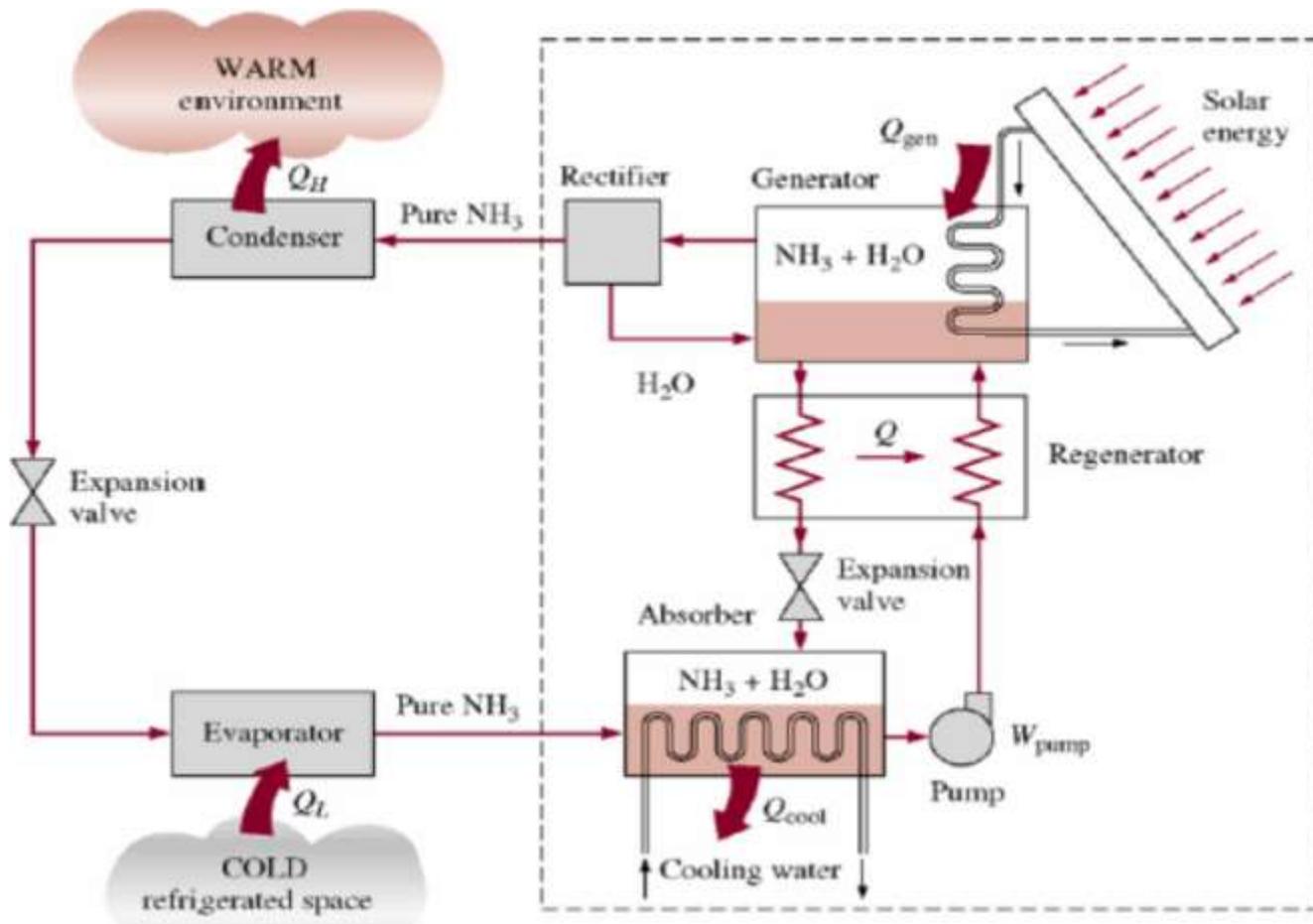
Processo

1. Depois de sair do evaporador, o amoníaco é dissolvido em água no absorvedor
 - Reacção exotérmica
2. O amoníaco com água é bombeado
3. A solução recebe calor no gerador e vaporiza o amoníaco
4. O rectificador separa a água que retorna ao absorvedor
5. Esta água é usada num regenerador para aquecer a solução antes do gerador



$$COP_F = \frac{Q_C}{Q_{gen} + W_{bomba}} \approx \frac{Q_C}{Q_{gen}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \left(\frac{T_c}{T_0 - T_c}\right)$$

Frigorífico Solar



Frigorífico “Solar” 2

