

# D.01.01 – Fundamentos de Refrigeração

## Refrigeração e Condicionamento de Ar

Prof. C. Naaktgeboren, PhD



<https://github.com/CNThermSci/AppThermSci>

Compiled on 2021-02-16 03h33m33s UTC

## 1 Sistemas e Processos de Refrigeração

- Introdução
- Classificação dos Sistemas
- Processos de Refrigeração

## 2 Aplicações de Refrigeração

- Classificação por Capacidade
- Classificação por Aplicação

## 3 Referências e Tópicos de Leitura

Esta apresentação baseia-se primordialmente na referência [1], **Capítulo 1** (tópico de leitura).

# Introdução à Refrigeração

- Refrigeração é a ação de **remoção de calor** de um **corpo ou espaço fechado** com o propósito de **reduzir sua temperatura**;

# Introdução à Refrigeração

- Refrigeração é a ação de **remoção de calor** de um **corpo ou espaço fechado** com o propósito de **reduzir sua temperatura**;
- Sistemas de refrigeração fazem isso criando uma **superfície fria** para troca de calor com o sistema a ser resfriado;

# Introdução à Refrigeração

- Refrigeração é a ação de remoção de calor de um **corpo ou espaço fechado** com o propósito de **reduzir sua temperatura**;
- Sistemas de refrigeração fazem isso criando uma **superfície fria** para troca de calor com o sistema a ser resfriado;
- Devido à **segunda lei da termodinâmica**, a superfície fria deve ser de **menor temperatura** em relação àquela objetivada para o sistema a ser resfriado.

# Introdução à Refrigeração

- Em **regime permanente**, o sistema de refrigeração **não acumula energia térmica** (interna); assim, o calor retirado do espaço refrigerado é **transferido para um meio externo**;

# Introdução à Refrigeração

- Em **regime permanente**, o sistema de refrigeração **não acumula energia térmica** (interna); assim, o calor retirado do espaço refrigerado é **transferido para um meio externo**;
- Sistemas de refrigeração fazem isso criando uma **superfície quente** para troca de calor com o meio externo;

# Introdução à Refrigeração

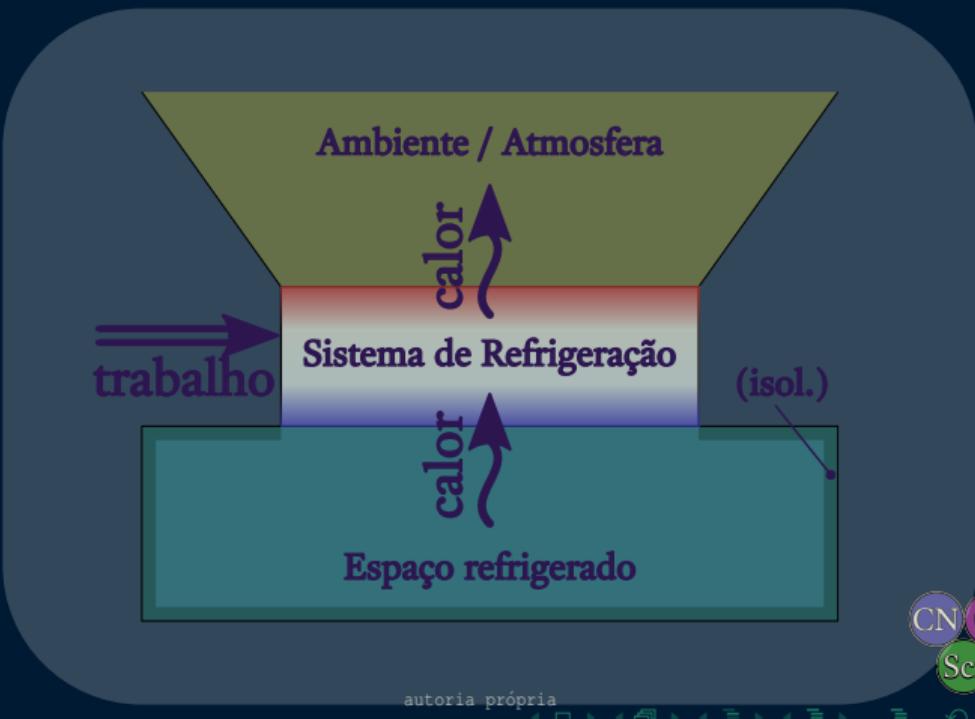
- Em **regime permanente**, o sistema de refrigeração **não acumula energia térmica** (interna); assim, o calor retirado do espaço refrigerado é **transferido para um meio externo**;
- Sistemas de refrigeração fazem isso criando uma **superfície quente** para troca de calor com o meio externo;
- Devido à **segunda lei da termodinâmica**, a superfície quente deve ser de maior temperatura em relação ao meio externo.

# Introdução à Refrigeração

- Em **regime permanente**, o sistema de refrigeração **não acumula energia térmica** (interna); assim, o calor retirado do espaço refrigerado é **transferido para um meio externo**;
- Sistemas de refrigeração fazem isso criando uma **superfície quente** para troca de calor com o meio externo;
- Devido à **segunda lei da termodinâmica**, a superfície quente deve ser de maior **temperatura** em relação ao meio externo.
- Também pela **segunda lei**, a operação do sistema de refrigeração não ocorre espontaneamente, havendo a necessidade de **fornecimento de trabalho**.

# Introdução à Refrigeração

- O esquemático ilustra um refrigerador genérico;
- Sistemas e interações energéticas são identificados;
- As cores empregadas são indicativas de temperatura.



# Tipos de Sistemas de Refrigeração

Dentre os tipos de sistema de refrigeração, destaca-se:

- Sistemas de **compressão de vapor**;

# Tipos de Sistemas de Refrigeração

Dentre os tipos de sistema de refrigeração, destaca-se:

- Sistemas de **compressão de vapor**;
- Sistemas à **ar** ou à **gás**;

# Tipos de Sistemas de Refrigeração

Dentre os tipos de sistema de refrigeração, destaca-se:

- Sistemas de **compressão de vapor**;
- Sistemas à **ar** ou à **gás**;
- Sistemas de **absorção**;

# Tipos de Sistemas de Refrigeração

Dentre os tipos de sistema de refrigeração, destaca-se:

- Sistemas de **compressão de vapor**;
- Sistemas à **ar ou à gás**;
- Sistemas de **absorção**;
- Sistemas **termo-elétricos**;

# Tipos de Sistemas de Refrigeração

Dentre os tipos de sistema de refrigeração, destaca-se:

- Sistemas de **compressão de vapor**;
- Sistemas à **ar ou à gás**;
- Sistemas de **absorção**;
- Sistemas **termo-elétricos**;
- Resfriadores **evaporativos**.

# Sistemas por Compressão de Vapor

- É o tipo atualmente **mais comumente utilizado** na atualidade;

# Sistemas por Compressão de Vapor

- É o tipo atualmente **mais comumente utilizado** na atualidade;
- O **fluido de trabalho** de tais sistemas é chamado de **refrigerante**;

# Sistemas por Compressão de Vapor

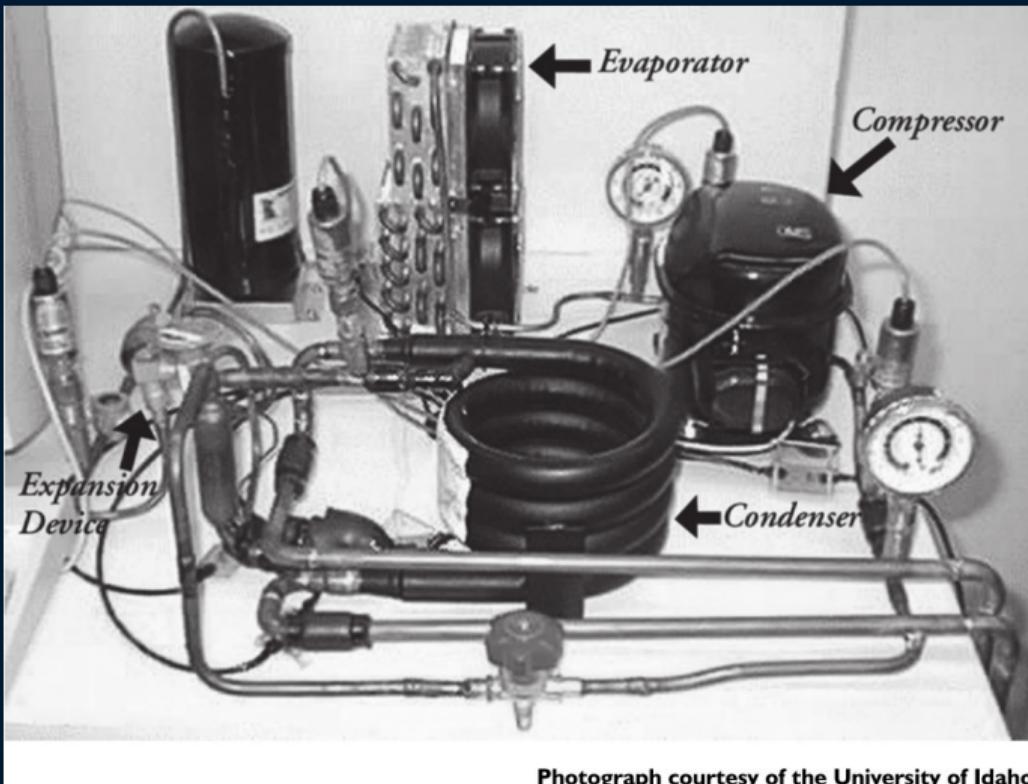
- É o tipo atualmente **mais comumente utilizado** na atualidade;
- O **fluido de trabalho** de tais sistemas é chamado de **refrigerante**;
- Em tais ciclos os refrigerantes **mudam de fase** entre **líquido e vapor**;

# Sistemas por Compressão de Vapor

- É o tipo atualmente **mais comumente utilizado** na atualidade;
- O **fluido de trabalho** de tais sistemas é chamado de **refrigerante**;
- Em tais ciclos os refrigerantes **mudam de fase** entre **líquido e vapor**;
- Os principais componentes são: **evaporador, compressor, condensador e dispositivo de expansão**;

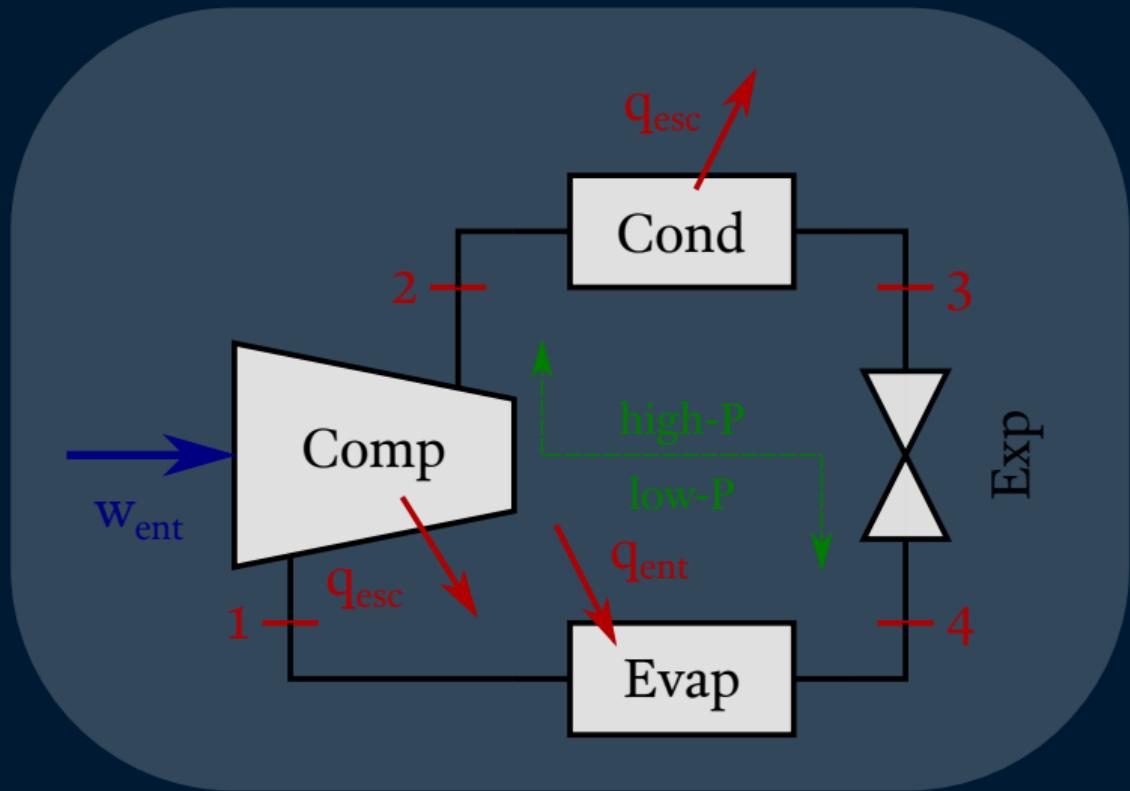
# Sistemas por Compressão de Vapor

- É o tipo atualmente **mais comumente utilizado** na atualidade;
- O **fluido de trabalho** de tais sistemas é chamado de **refrigerante**;
- Em tais ciclos os refrigerantes **mudam de fase** entre **líquido e vapor**;
- Os principais componentes são: **evaporador, compressor, condensador e dispositivo de expansão**;
- Um pequeno sistema (**ciclo**) é ilustrado a seguir:



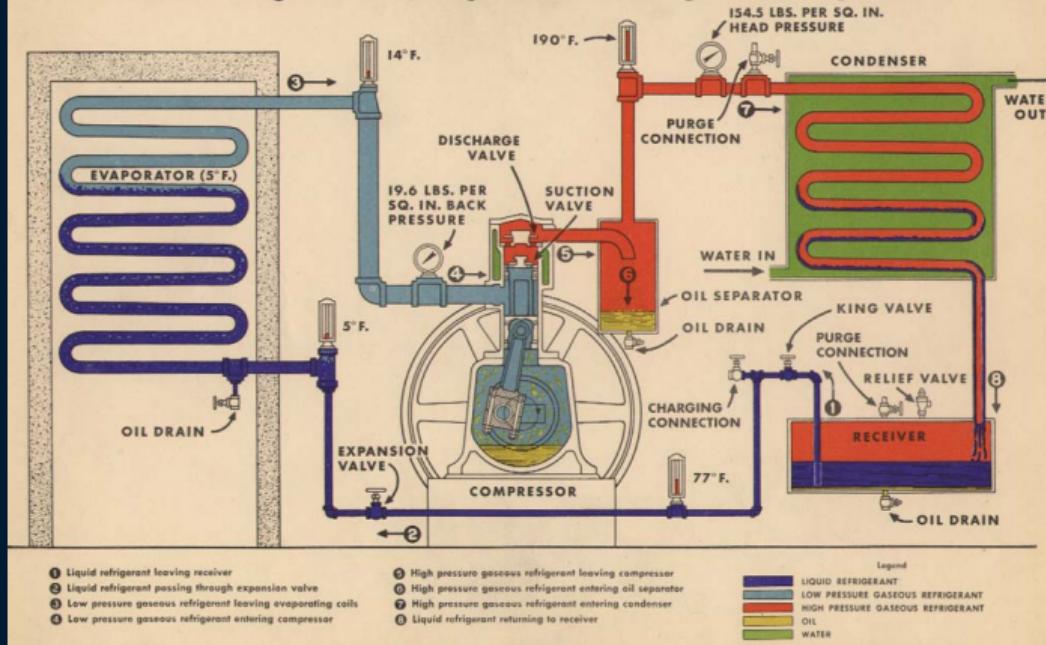
Photograph courtesy of the University of Idaho

Sistema simples de refrigeração por compressão de vapor.  
Fonte: referência [1]



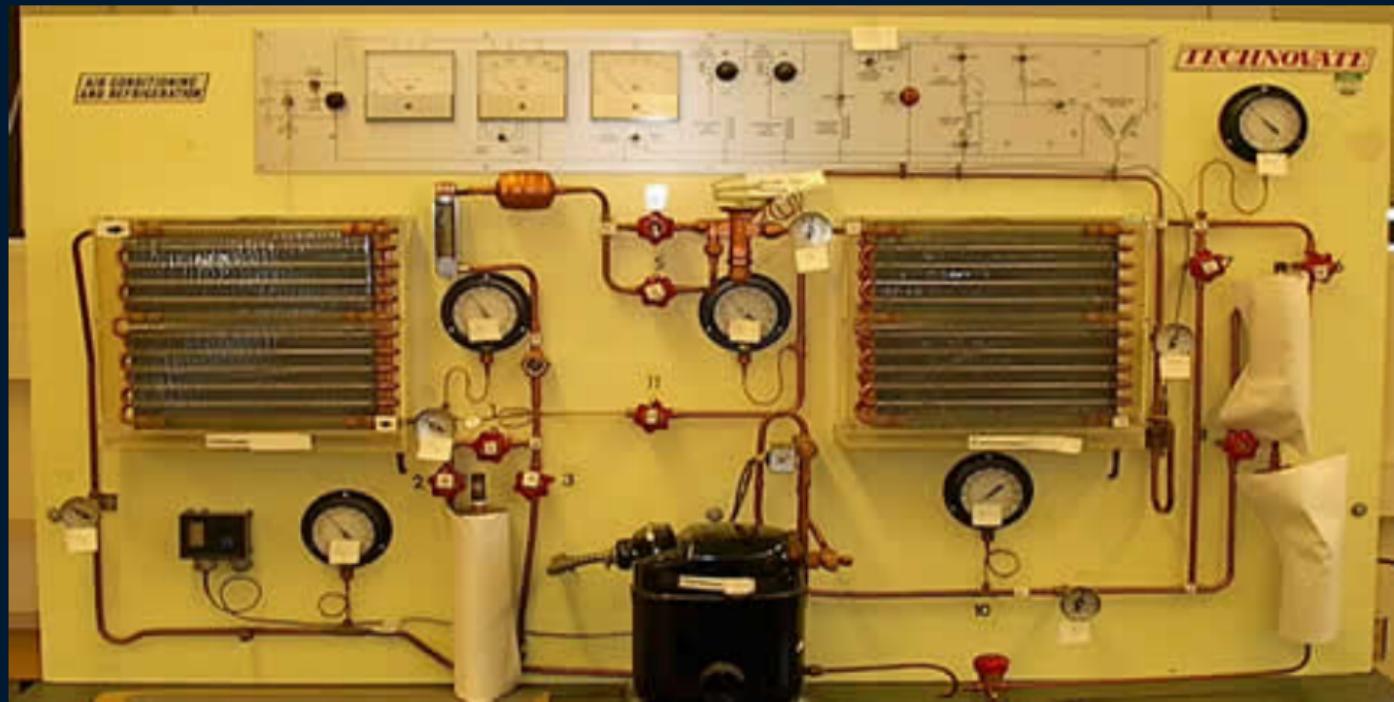
Esquemático de sistema de refrigeração por compressão de vapor.  
Fonte: autoria própria

## Flow Diagram of Compression Refrigeration System



- ① Liquid refrigerant leaving receiver
- ② Liquid refrigerant passing through expansion valve
- ③ Low pressure gaseous refrigerant leaving evaporating coils
- ④ Low pressure gaseous refrigerant entering compressor

- ⑤ High pressure gaseous refrigerant leaving compressor
- ⑥ High pressure gaseous refrigerant entering oil separator
- ⑦ High pressure gaseous refrigerant entering condenser
- ⑧ Liquid refrigerant returning to receiver











# Sistemas a Ar (Gás)

- O fluido de trabalho de tais sistemas é um gás, geralmente o ar;

# Sistemas a Ar (Gás)

- O fluido de trabalho de tais sistemas é um gás, geralmente o ar;
- Nos sistemas a gás, o fluido de trabalho não muda de fase, sendo sempre um gás;

# Sistemas a Ar (Gás)

- O fluido de trabalho de tais sistemas é um gás, geralmente o ar;
- Nos sistemas a gás, o fluido de trabalho não muda de fase, sendo sempre um gás;
- Processos incluem o de (i) compressão de ar, no qual a sua temperatura aumenta;

# Sistemas a Ar (Gás)

- O fluido de trabalho de tais sistemas é um gás, geralmente o ar;
- Nos sistemas a gás, o fluido de trabalho não muda de fase, sendo sempre um gás;
- Processos incluem o de (i) compressão de ar, no qual a sua temperatura aumenta;
- (ii) troca de calor (sensível) para a atmosfera, no qual a sua temperatura diminui;

# Sistemas a Ar (Gás)

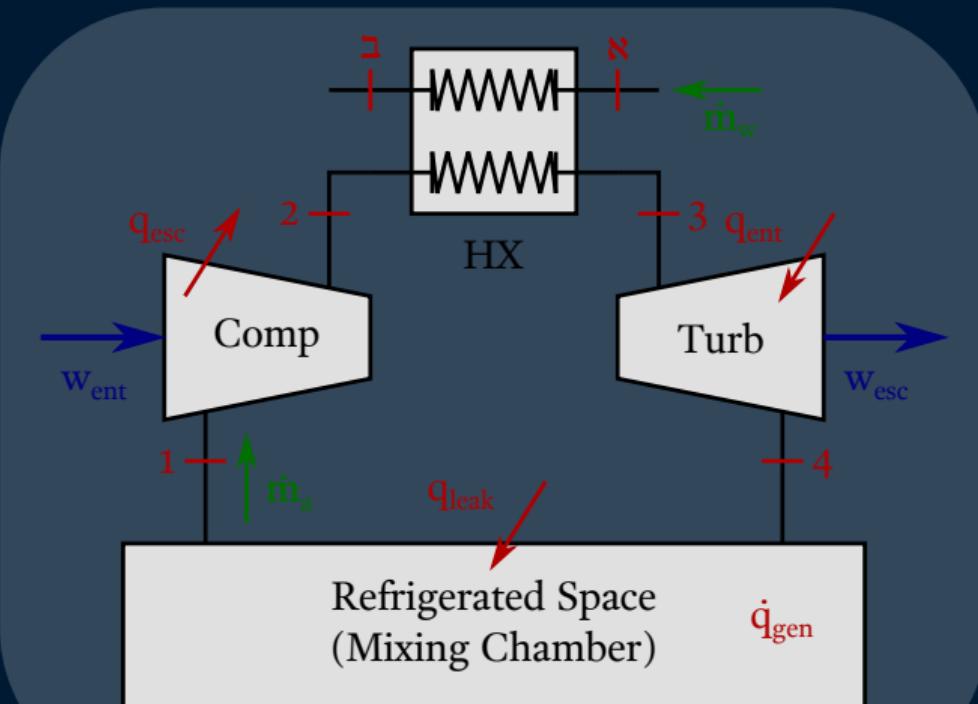
- O fluido de trabalho de tais sistemas é um gás, geralmente o ar;
- Nos sistemas a gás, o fluido de trabalho não muda de fase, sendo sempre um gás;
- Processos incluem o de (i) compressão de ar, no qual a sua temperatura aumenta;
- (ii) troca de calor (sensível) para a atmosfera, no qual a sua temperatura diminui;
- (iii) expansão em um dispositivo que recupera trabalho, que provoca a redução da temperatura do ar;

# Sistemas a Ar (Gás)

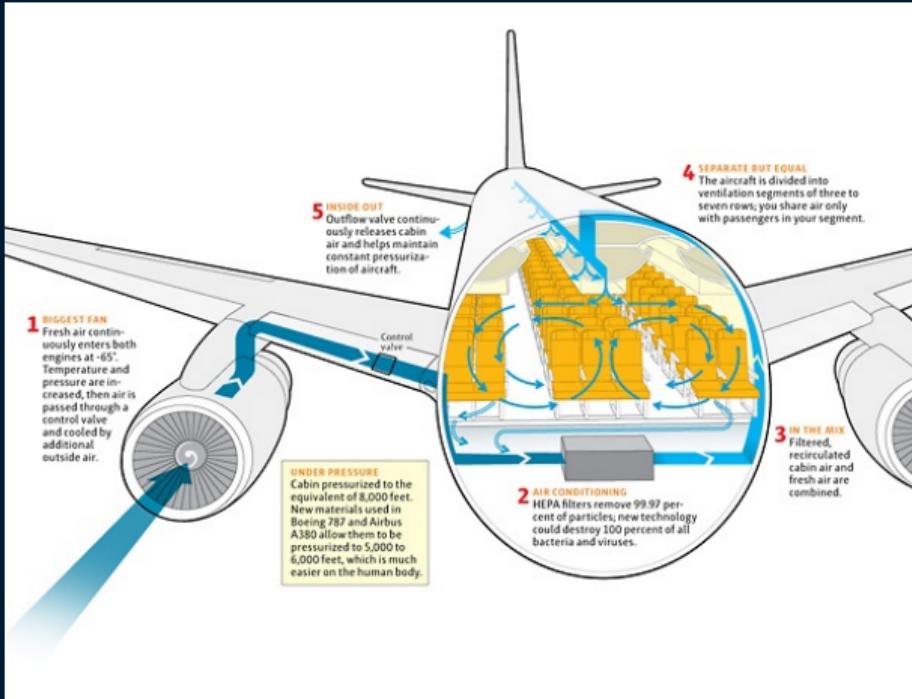
- O fluido de trabalho de tais sistemas é um gás, geralmente o ar;
- Nos sistemas a gás, o fluido de trabalho não muda de fase, sendo sempre um gás;
- Processos incluem o de (i) compressão de ar, no qual a sua temperatura aumenta;
- (ii) troca de calor (sensível) para a atmosfera, no qual a sua temperatura diminui;
- (iii) expansão em um dispositivo que recupera trabalho, que provoca a redução da temperatura do ar;
- (iv) mistura do ar expandido com aquele do espaço refrigerado, ou seja: injeção de ar frio diretamente no espaço refrigerado.

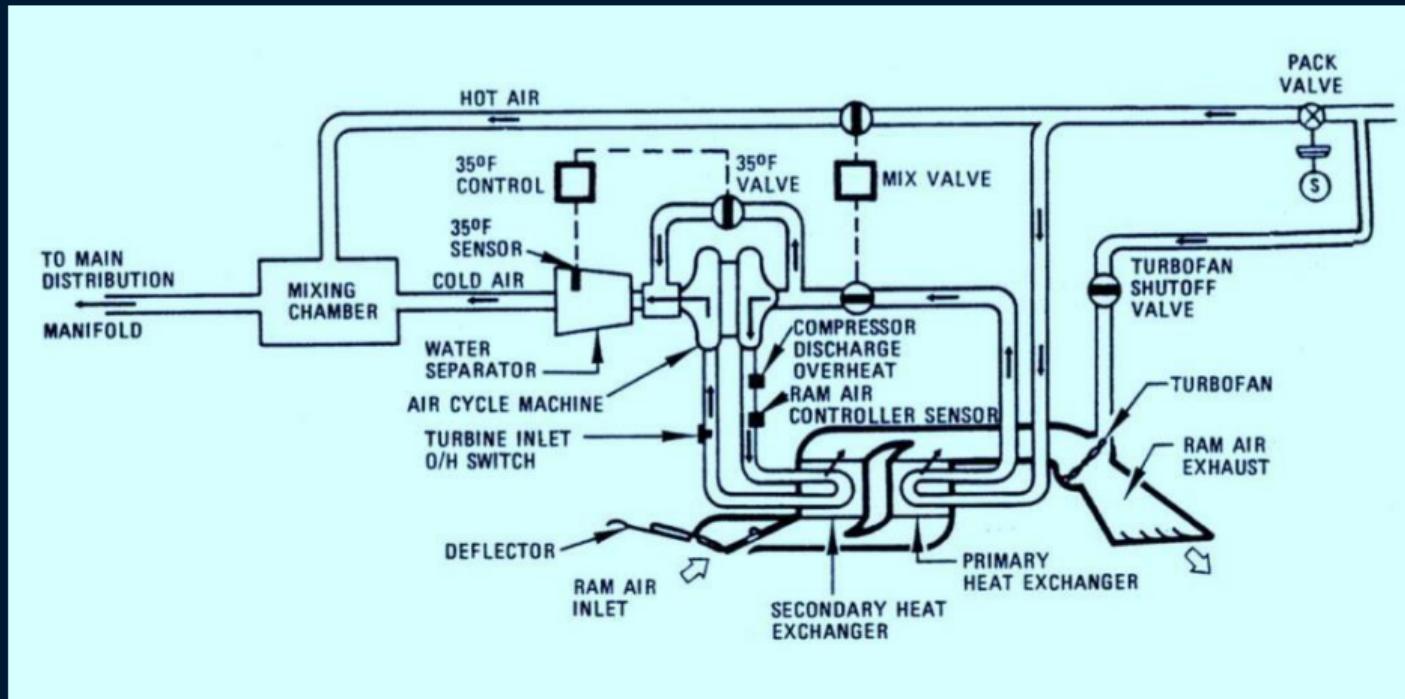
# Sistemas a Ar (Gás)

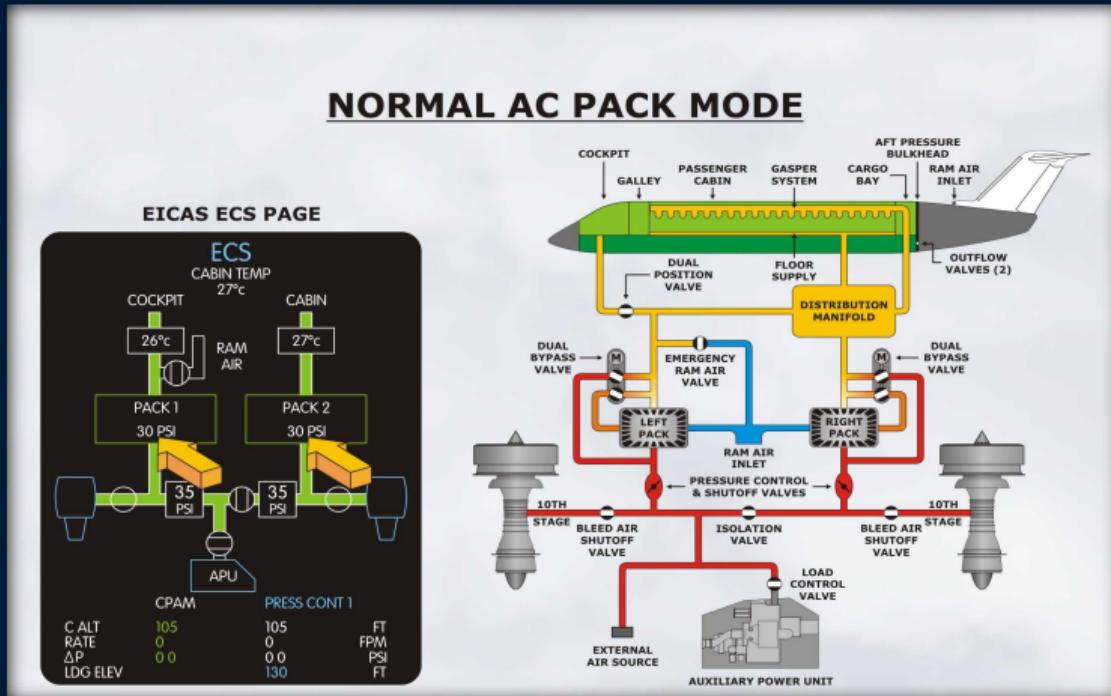
- O fluido de trabalho de tais sistemas é um gás, geralmente o ar;
- Nos sistemas a gás, o fluido de trabalho não muda de fase, sendo sempre um gás;
- Processos incluem o de (i) compressão de ar, no qual a sua temperatura aumenta;
- (ii) troca de calor (sensível) para a atmosfera, no qual a sua temperatura diminui;
- (iii) expansão em um dispositivo que recupera trabalho, que provoca a redução da temperatura do ar;
- (iv) mistura do ar expandido com aquele do espaço refrigerado, ou seja: injeção de ar frio diretamente no espaço refrigerado.
- Sistemas e variantes são ilustrados a seguir:

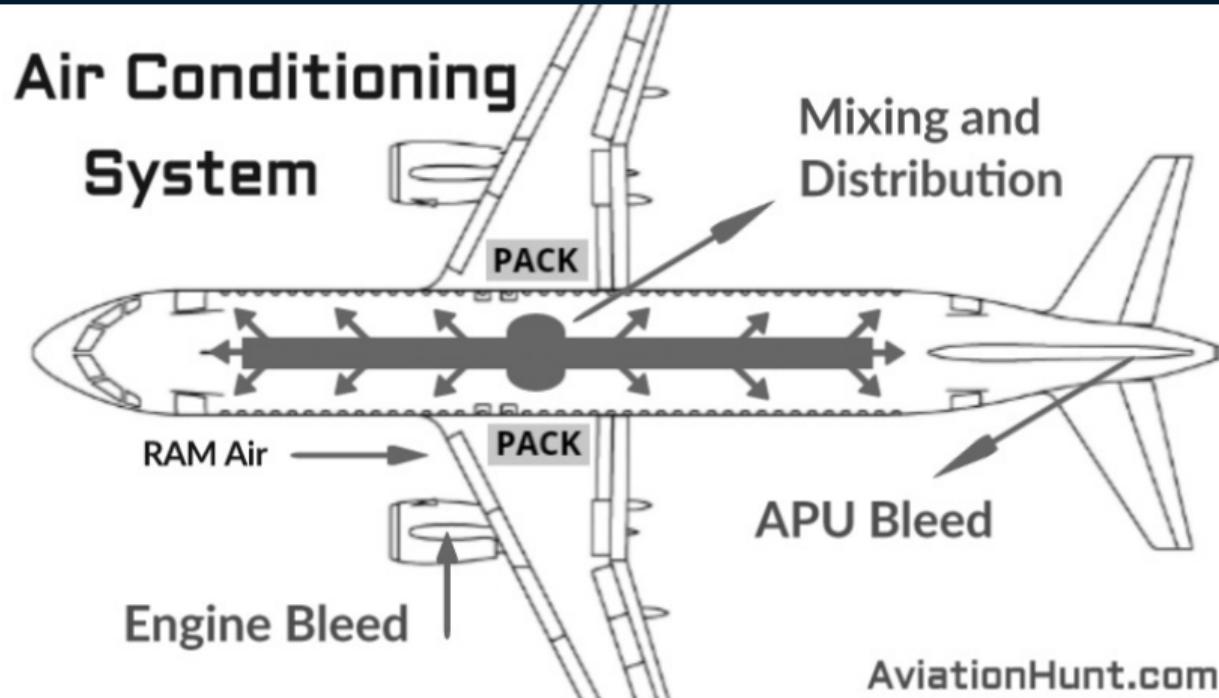


Esquemático de sistema de refrigeração a ar.  
Fonte: autoria própria









AviationHunt.com

# Sistemas de Absorção

- Sistemas de **absorção** são semelhantes a sistemas a **vapor**;

# Sistemas de Absorção

- Sistemas de **absorção** são semelhantes a sistemas a **vapor**;
- Porém, sistemas de absorção trocam **compressão de gás** por **bombeamento de líquido**;

# Sistemas de Absorção

- Sistemas de **absorção** são semelhantes a sistemas a **vapor**;
- Porém, sistemas de absorção trocam **compressão de gás** por **bombeamento de líquido**;
- Isto evidentemente **economiza trabalho**;

# Sistemas de Absorção

- Sistemas de **absorção** são semelhantes a sistemas a **vapor**;
- Porém, sistemas de absorção trocam **compressão de gás** por **bombeamento de líquido**;
- Isto evidentemente **economiza trabalho**;
- Porém exige **fornecimentos e retiradas de calor** extras na **absorção e geração** do vapor;

# Sistemas de Absorção

- Sistemas de **absorção** são semelhantes a sistemas a **vapor**;
- Porém, sistemas de absorção trocam **compressão de gás** por **bombeamento de líquido**;
- Isto evidentemente **economiza trabalho**;
- Porém exige **fornecimentos e retiradas de calor** extras na **absorção e geração** do vapor;
- Tais sistemas utilizam fluidos **refrigerante e absorvente**;

# Sistemas de Absorção

- Sistemas de **absorção** são semelhantes a sistemas a **vapor**;
- Porém, sistemas de absorção trocam **compressão de gás** por **bombeamento de líquido**;
- Isto evidentemente **economiza trabalho**;
- Porém exige **fornecimentos e retiradas de calor** extras na **absorção e geração** do vapor;
- Tais sistemas utilizam fluidos **refrigerante e absorvente**;
- Variantes **mais comuns**: (i) NH<sub>3</sub> em H<sub>2</sub>O e (ii) H<sub>2</sub>O em LiBr;

# Sistemas de Absorção

- Sistemas de **absorção** são semelhantes a sistemas a **vapor**;
- Porém, sistemas de absorção trocam **compressão de gás** por **bombeamento de líquido**;
- Isto evidentemente **economiza trabalho**;
- Porém exige **fornecimentos e retiradas de calor** extras na **absorção e geração** do vapor;
- Tais sistemas utilizam fluidos **refrigerante e absorvente**;
- Variantes **mais comuns**: (i) NH<sub>3</sub> em H<sub>2</sub>O e (ii) H<sub>2</sub>O em LiBr;
- Solubilidade do refrigerante no absorvente é **função da temperatura**.

# Sistemas de Absorção – Solubilidade de NH<sub>3</sub> em H<sub>2</sub>O



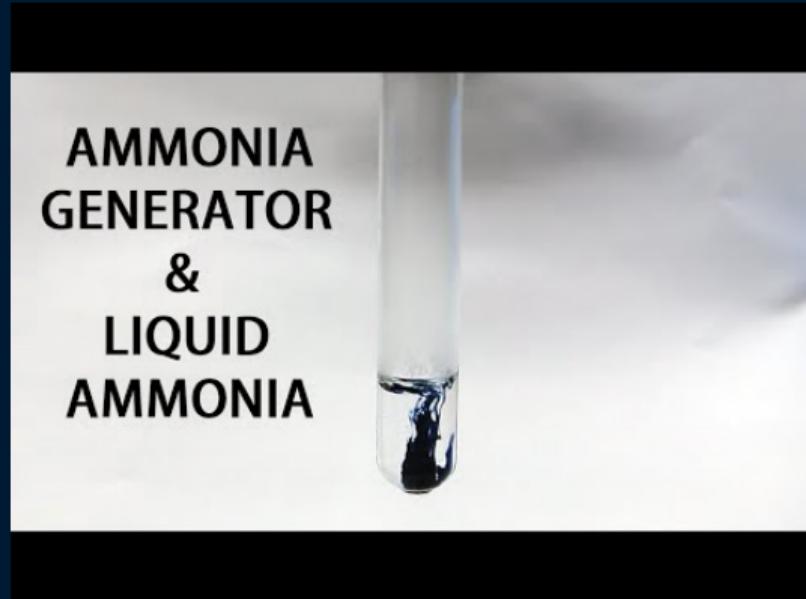
 <https://www.youtube.com/watch?v=N07V6TMQuBs>

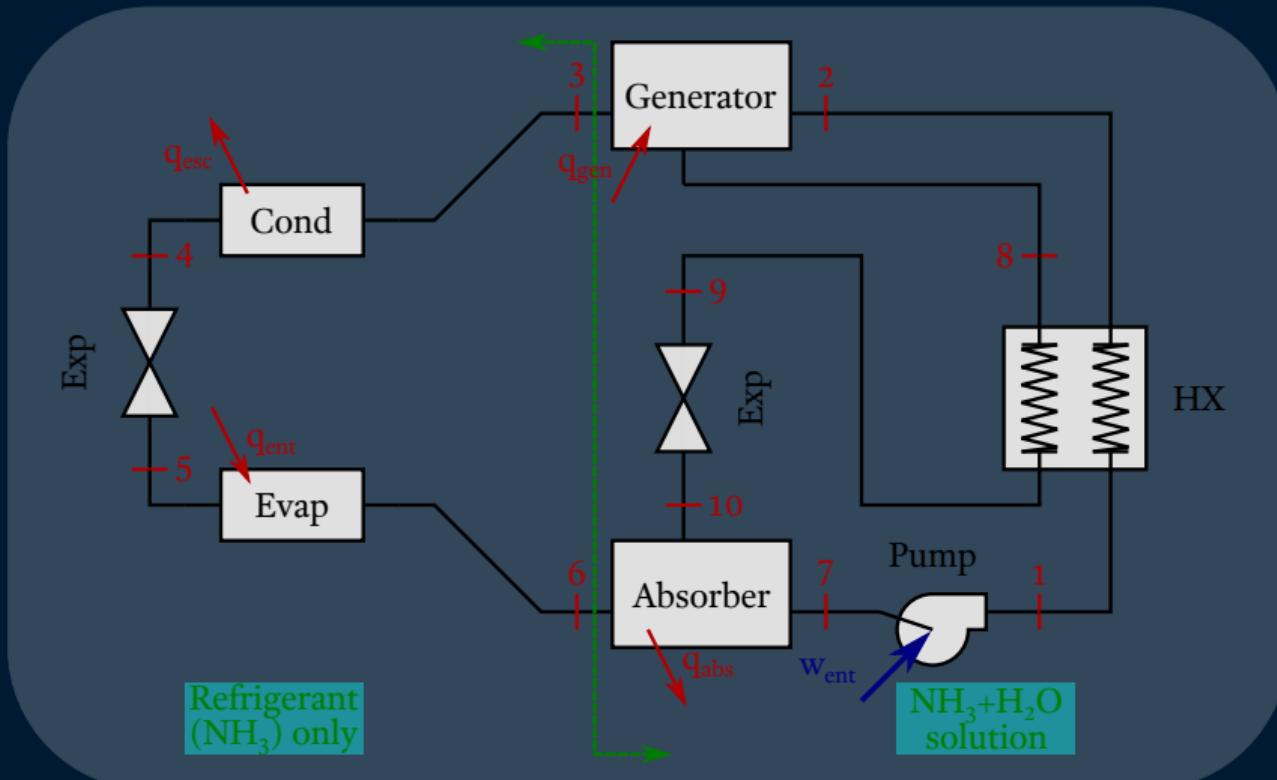


<https://www.youtube.com/watch?v=LijJ3Z8a6Id0>



# Sistemas de Absorção – Solubilidade de NH<sub>3</sub> em H<sub>2</sub>O



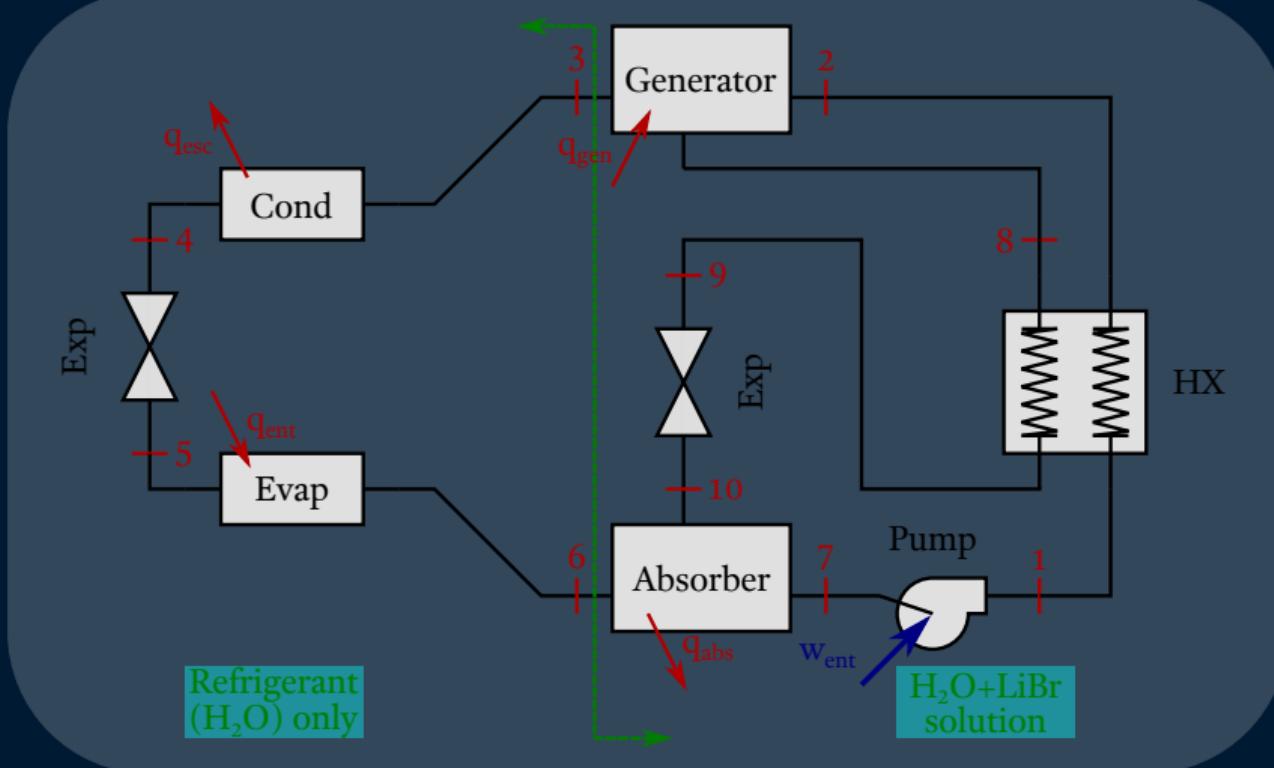


Esquemático de sistema de refrigeração por absorção Água-Amônia.  
Fonte: autoria própria

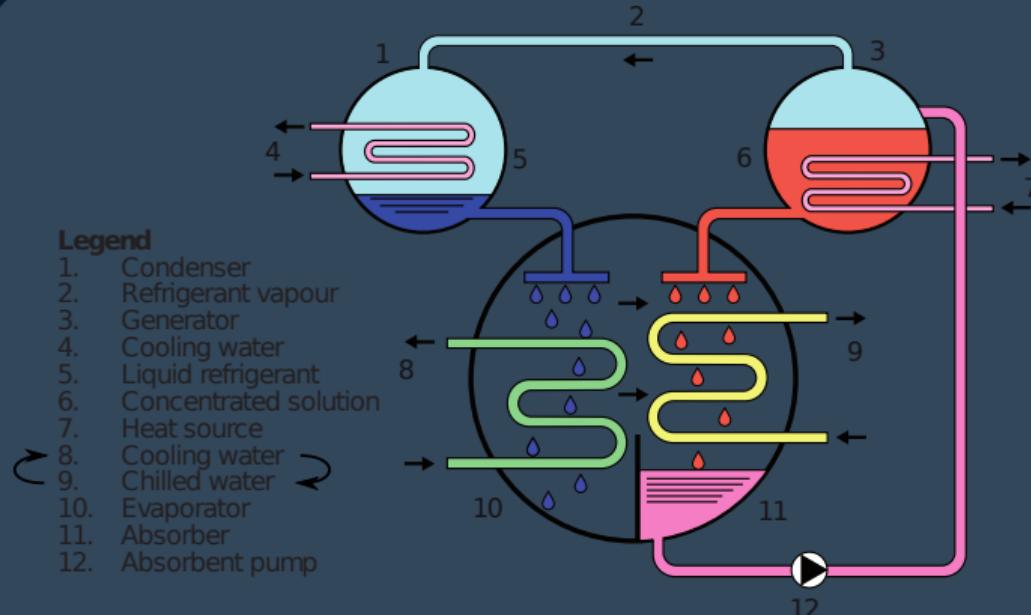
**Table I. Crystallization Points of Aqueous Lithium Bromide Solutions at 1 atm.**

Temperature (K)	Concentration of Lithium bromide (%)
309.15	64.01
301.15	61.64
288.15	59.30
269.65	56.65
260.15	53.98
251.15	52.20
242.15	50.49

Sistema simples de refrigeração por compressão de vapor.  
Fonte: referência [2]







**Figure 1 - Simplified absorption cycle**

# Sistemas Termo-Elétricos

- Exploram o **efeito Peltier**;

# Sistemas Termo-Elétricos

- Exploram o **efeito Peltier**;
- Resfriamento e aquecimento de junções **semicondutoras dissimilares**;

# Sistemas Termo-Elétricos

- Exploram o **efeito Peltier**;
- Resfriamento e aquecimento de junções **semicondutoras dissimilares**;
- Pela passagem de corrente elétrica, i.e., trabalho **elétrico**.

# Sistemas Termo-Elétricos

- Exploram o **efeito Peltier**;
- Resfriamento e aquecimento de junções **semicondutoras dissimilares**;
- Pela passagem de corrente elétrica, i.e., trabalho **elétrico**.
- Superfície fria pode **absorver calor** do espaço refrigerado;

# Sistemas Termo-Elétricos

- Exploram o **efeito Peltier**;
- Resfriamento e aquecimento de junções **semicondutoras dissimilares**;
- Pela passagem de corrente elétrica, i.e., trabalho **elétrico**.
- Superfície fria pode **absorver calor** do espaço refrigerado;
- Superfície aquecida pode **transferir calor** ao ambiente;

# Sistemas Termo-Elétricos

- Exploram o **efeito Peltier**;
- Resfriamento e aquecimento de junções **semicondutoras dissimilares**;
- Pela passagem de corrente elétrica, i.e., trabalho **elétrico**.
- Superfície fria pode **absorver calor** do espaço refrigerado;
- Superfície aquecida pode **transferir calor** ao ambiente;
- Sistemas **práticos** utilizam juntas semicondutoras em série ( $\uparrow \Delta T$ ).



Photograph courtesy of Thermoelectric Cooler of America, Inc.

(a)

(b)

**Figure I-5 Thermoelectric coolers in two configurations: (a) with a flat cold plate and (b) using an air fan.**

Sistema simples de refrigeração por compressão de vapor.  
Fonte: referência [1]









# Resfriadores Evaporativos

Coluna com 55% de largura:

- Funcionam por evaporação direta de água no ar;



# Resfriadores Evaporativos

Coluna com 55% de largura:

- Funcionam por **evaporação direta** de água no ar;
- Exemplo: mecanismo de **sudorese** do nosso corpo;



# Resfriadores Evaporativos

Coluna com 55% de largura:

- Funcionam por **evaporação direta** de água no ar;
- Exemplo: mecanismo de **sudorese** do nosso corpo;
- Eficazes em locais **secos, desérticos**;



# Resfriadores Evaporativos

Coluna com 55% de largura:

- Funcionam por **evaporação direta** de água no ar;
- Exemplo: mecanismo de **sudorese** do nosso corpo;
- Eficazes em locais **secos, desérticos**;
- Empregado em **condicionamento de ar** e em **refrigeração**;



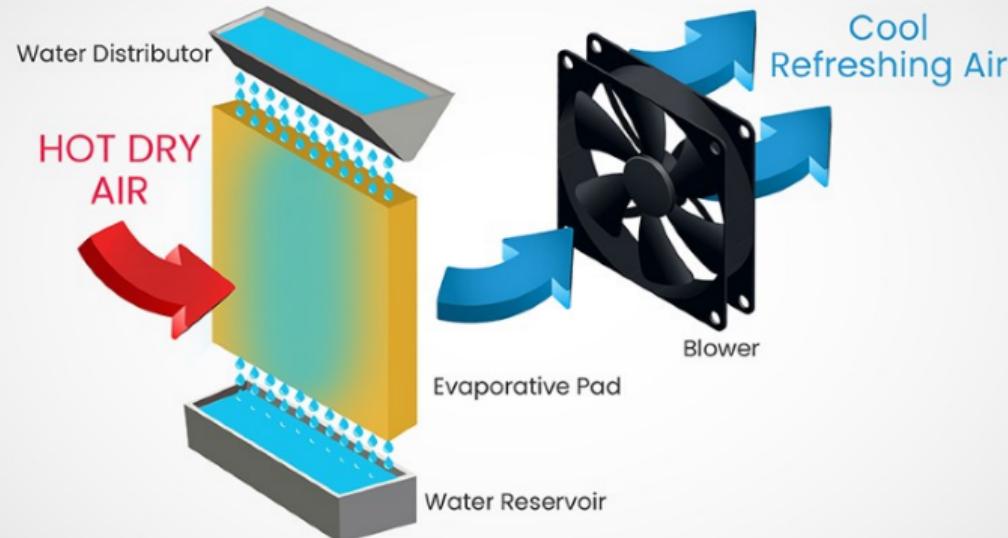
# Resfriadores Evaporativos

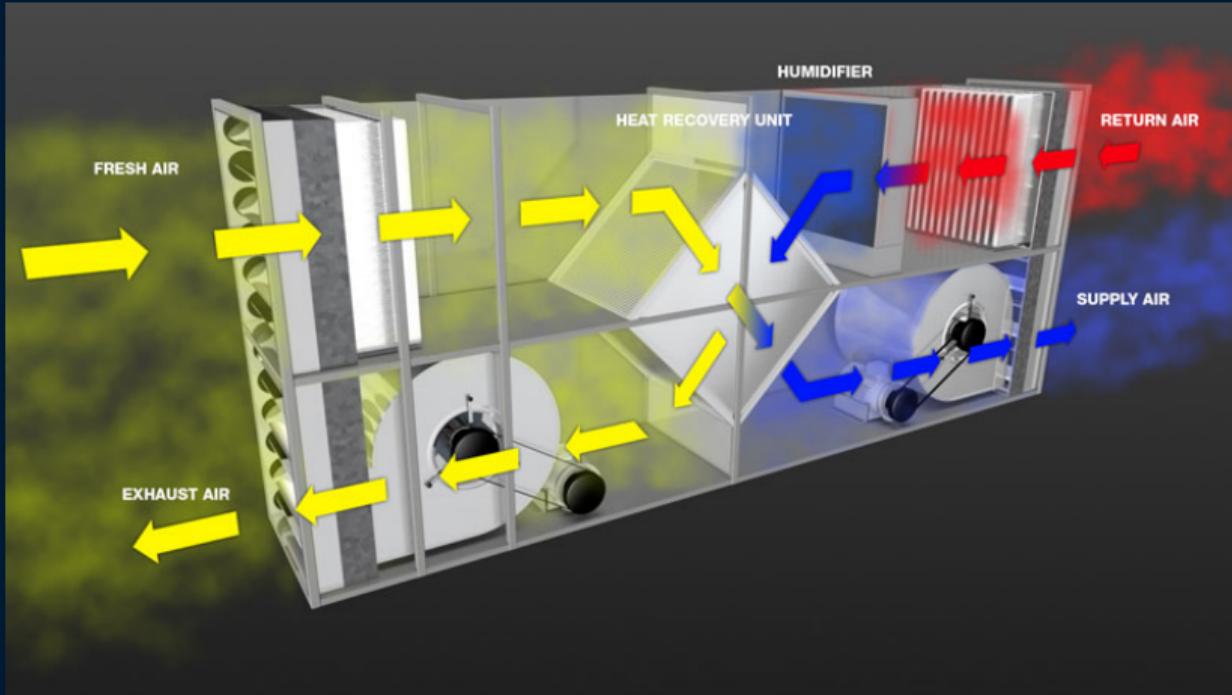
Coluna com 55% de largura:

- Funcionam por **evaporação direta** de água no ar;
- Exemplo: mecanismo de **sudorese** do nosso corpo;
- Eficazes em locais **secos, desérticos**;
- Empregado em **condicionamento de ar** e em **refrigeração**;
- Empregado em sistemas **passivos** e também ativos.

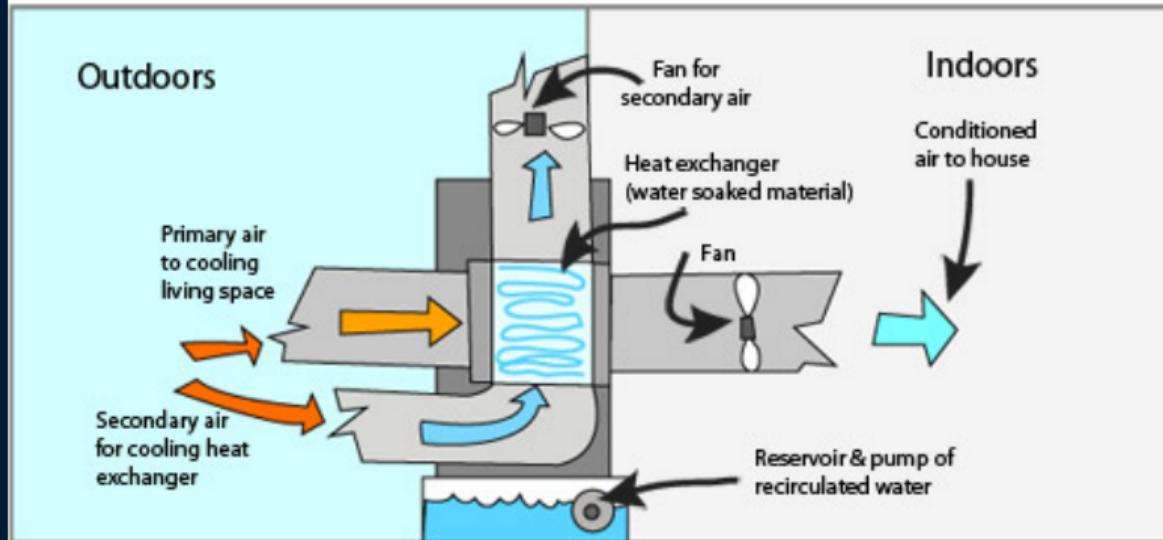


## HOW EVAPORATIVE COOLING WORKS





## 2-Stage or Indirect/Direct Evaporative Cooling



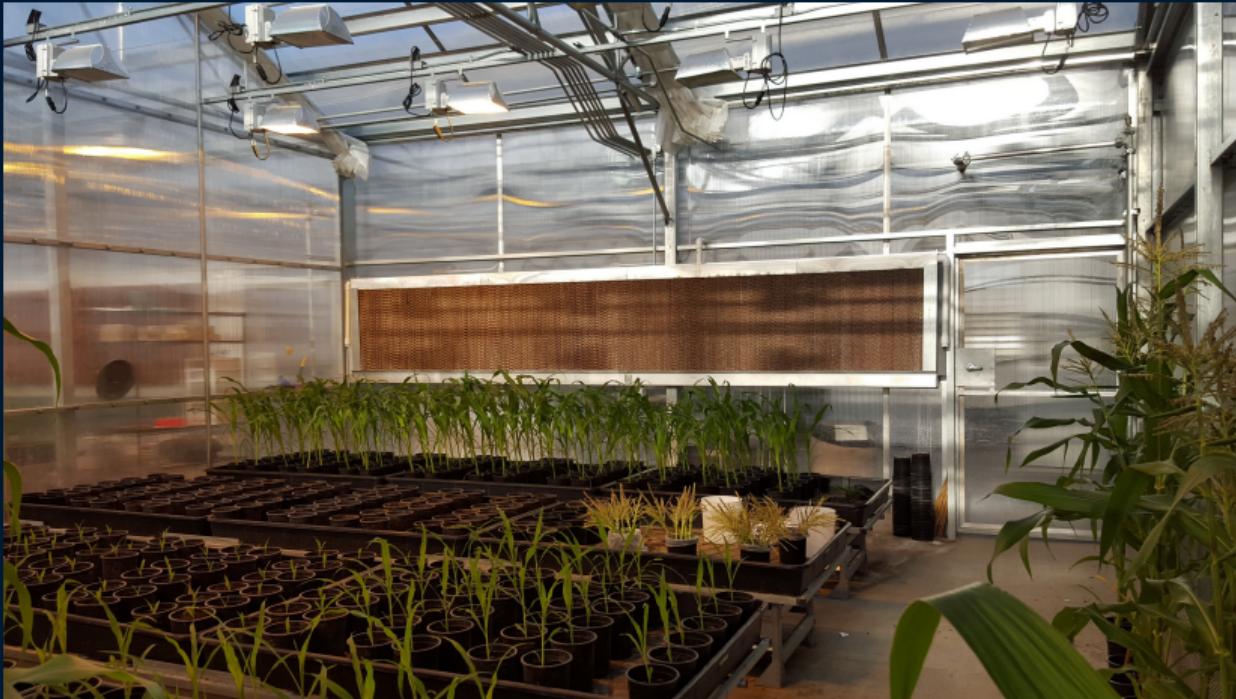














# Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor

- Definições;
- Item 2;
- Item 3.

# Ciclo Bomba de Calor

- Definições;
- Item 2;
- Item 3.

# O Ramo de Refrigeração

- Doméstico, menos de 20 kW;

# O Ramo de Refrigeração

- Doméstico, menos de 20 kW;
- Comercial, mais de 20 kW;

# O Ramo de Refrigeração

- Doméstico, menos de 20 kW;
- Comercial, mais de 20 kW;
- Industrial, de pequeno a muito grande.

# Aplicações de Refrigeração

- Condicionamento de ar residencial;

# Aplicações de Refrigeração

- Condicionamento de ar residencial;
- Condicionamento de ar veicular;

# Aplicações de Refrigeração

- Condicionamento de ar residencial;
- Condicionamento de ar veicular;
- Condicionamento de ar de médios e grandes edificações;

# Aplicações de Refrigeração

- Condicionamento de ar residencial;
- Condicionamento de ar veicular;
- Condicionamento de ar de médios e grandes edificações;
- Transporte de cargas;

# Aplicações de Refrigeração

- Condicionamento de ar residencial;
- Condicionamento de ar veicular;
- Condicionamento de ar de médios e grandes edificações;
- Transporte de cargas;
- Refrigeração residencial;

# Aplicações de Refrigeração

- Condicionamento de ar residencial;
- Condicionamento de ar veicular;
- Condicionamento de ar de médios e grandes edificações;
- Transporte de cargas;
- Refrigeração residencial;
- Refrigeração de máquinas de venda;

# Aplicações de Refrigeração

- Condicionamento de ar residencial;
- Condicionamento de ar veicular;
- Condicionamento de ar de médios e grandes edificações;
- Transporte de cargas;
- Refrigeração residencial;
- Refrigeração de máquinas de venda;
- Ar-condicionado industrial;

# Aplicações de Refrigeração

- Condicionamento de ar residencial;
- Condicionamento de ar veicular;
- Condicionamento de ar de médios e grandes edificações;
- Transporte de cargas;
- Refrigeração residencial;
- Refrigeração de máquinas de venda;
- Ar-condicionado industrial;
- Refrigeração industrial;

# Ar-condicionado Industrial

- Item 1;

# Ar-condicionado Industrial

- Item 1;
- Item 2;

# Ar-condicionado Industrial

- Item 1;
- Item 2;
- Item 3.

# Refrigeração Industrial

- Item 1;

# Refrigeração Industrial

- Item 1;
- Item 2;

# Refrigeração Industrial

- Item 1;
- Item 2;
- Item 3.

# Referências – I

- [1] D. L. Fenton.  
*Fundamentals of refrigeration: A course book for self-directed or group learning.*  
ASHRAE, second edition edition, 2016.
- [2] R. Peters, R. Busse, and J. U. Keller.  
Solid-liquid equilibria in the systems NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O-LiBr and H<sub>2</sub>O-LiBr at p=1 atm in the range from -35 to 80°C.  
*International Journal of Thermophysics*, 14(4):763–775, 1993.



**Photo by Pixabay from Pexels**

<https://www.pexels.com/photo/cold-dark-eerie-fear-207985/>