



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA - EEL

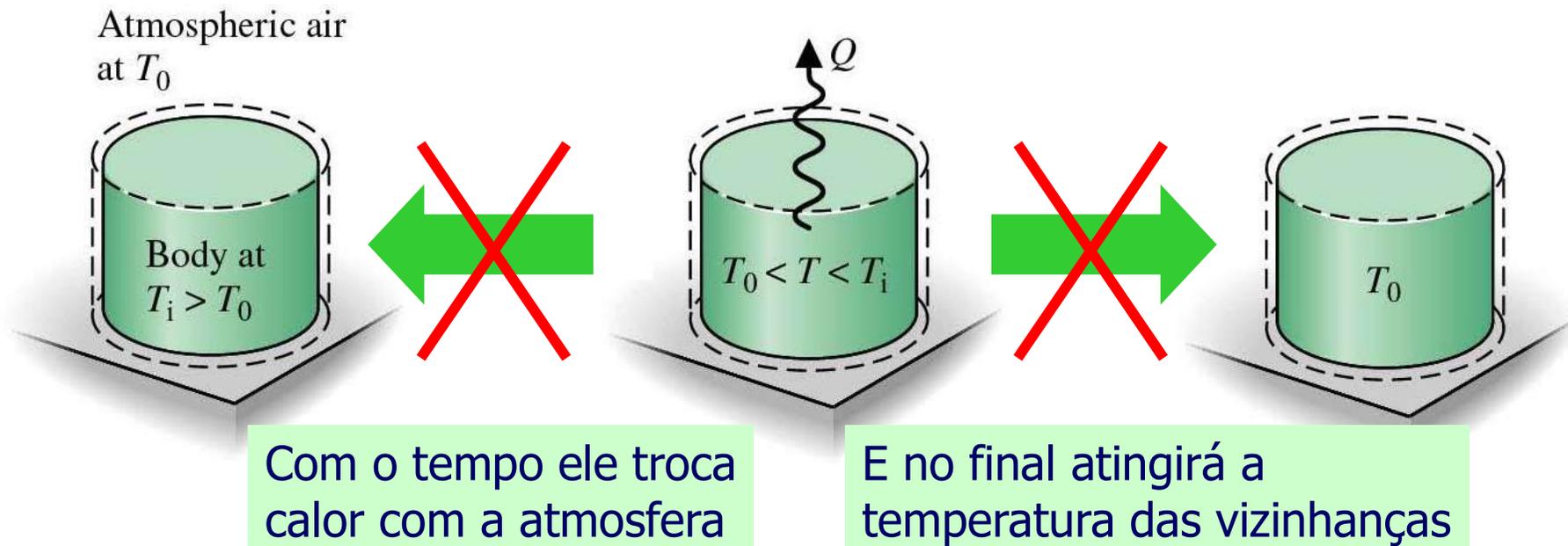
# TERMODINÂMICA APLICADA

## A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Prof Antonio Carlos da Silva

# TROCA DE CALOR ESPONTÂNEA

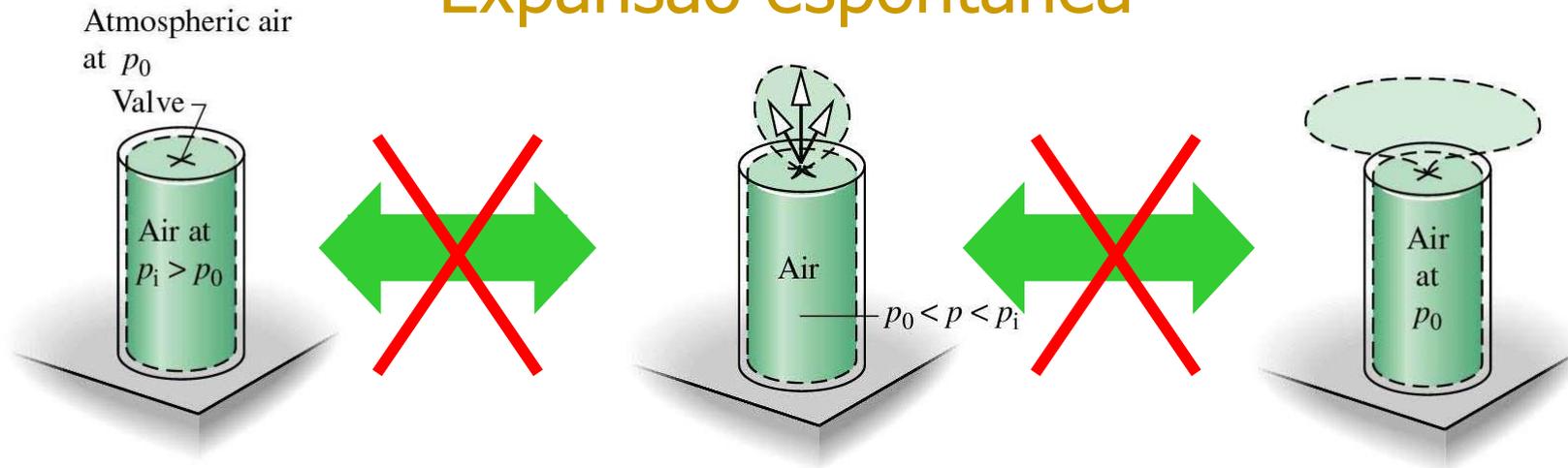
- Um objeto a uma temperatura elevada  $T_i$  é colocado em contato com o ar atmosférico à  $T_o < T_i$  ;



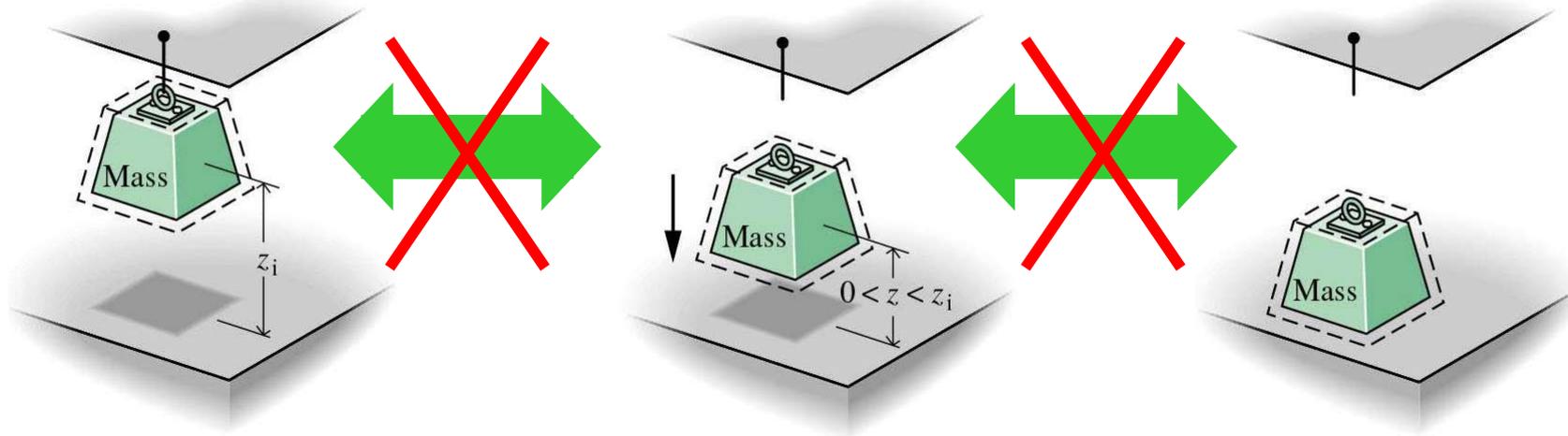
Apesar da energia total do sistema ser conservada, o processo inverso não ocorre **espontaneamente**

# PROCESSOS ESPONTÂNEOS

## Expansão espontânea



## Massa em queda



# A DIREÇÃO DOS PROCESSOS

- Nos exemplos anteriores percebe-se que a **lei da conservação é respeitada**, porém não é possível realizar **espontaneamente** os **processos inversos**, para isso seria necessário um **dispositivo auxiliar**;
- Quando se utiliza a Segunda Lei da Termodinâmica é possível determinar as **direções preferenciais** de um processo, assim como o **estado final do equilíbrio** de uma interação de energia.

# TRABALHO MÁXIMO QUE PODE SER OBTIDO NUM PROCESSO

- A segunda lei é capaz de avaliar qual o **máximo trabalho teórico** que seria possível de se obter de sistemas em desequilíbrio;
- E como **não existe** um **aproveitamento perfeito**, a Segunda Lei também torna possível a **avaliação** dos fatores de **perda** de oportunidades de realizar trabalho.

# ASPECTOS DA SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

- ▶ Prever a **direção** dos processos,
- ▶ Estabelecer as condições de **equilíbrio**,
- ▶ Determinar o **melhor** desempenho teórico de sistemas
- ▶ Avaliar fatores de **perda** ou **rendimento**

# DEFINIÇÕES DA SEGUNDA LEI

- O Estudo da Segunda Lei da Termodinâmica remonta às primeiras décadas do século XIX.
- Há vários enunciados da 2ª Lei.
- São baseados em observações experimentais.
- **Importantes:**
  - Enunciado de Clausius**
  - Enunciado de Kelvin-Planck**

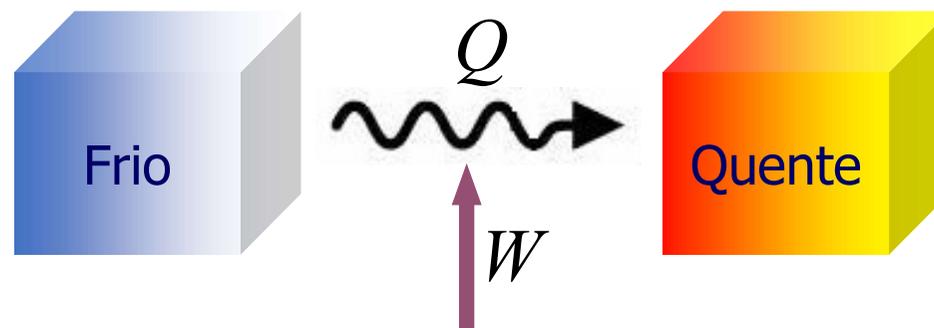
# ENUNCIADO DE CLAUSIUS DA 2ª LEI

- É **impossível** para qualquer sistema operar de maneira que o **único efeito** seja uma transferência de energia sob a forma de calor de um corpo **mais frio** para um corpo **mais quente**.



# ANÁLISE DO ENUNCIADO DE CLAUSIUS

- O enunciado de Clausius **não exclui** a possibilidade da transferência de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente (isso ocorre nos **refrigeradores**).
- Entretanto a expressão “**único efeito**” sugere que isso **possa** ocorrer, desde que seja **fornecida energia (trabalho)** ao sistema.

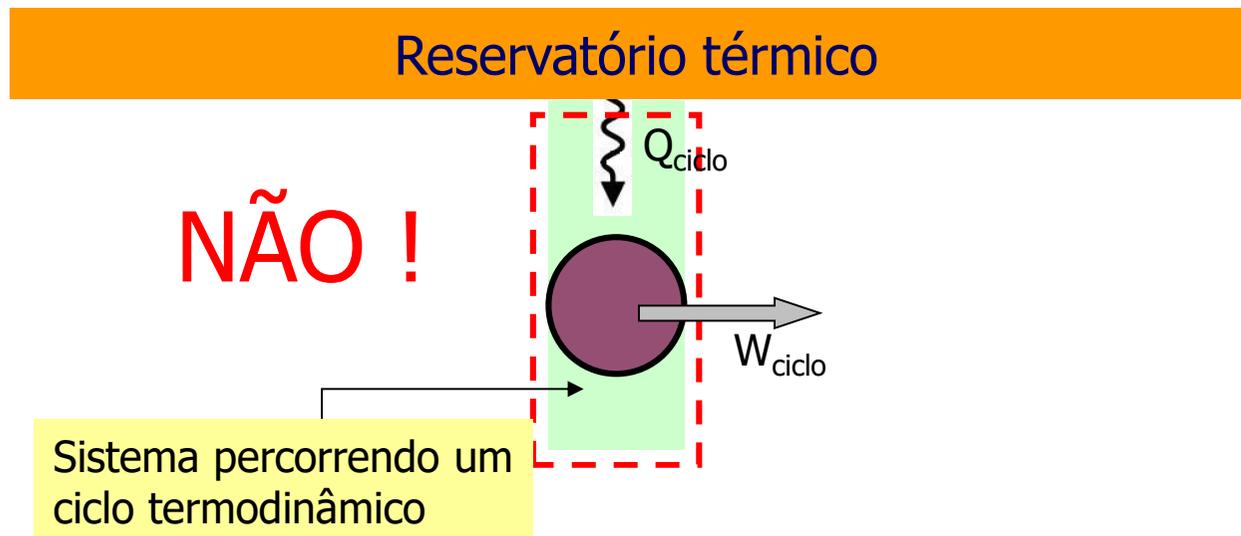


# RESERVATÓRIO TÉRMICO – CONCEITO

- **Reservatório Térmico** → É um sistema idealizado, onde a **temperatura permanece constante** mesmo que energia, na forma de calor, seja **adicionada** ou **removida**;
- **Exemplos:** atmosfera terrestre, oceanos, lagos, substâncias mudando de fase, ...

# ENUNCIADO DE KELVIN-PLANC PARA A 2ª LEI DA TERMODINÂMICA

- É impossível para qualquer sistema **operar em um ciclo termodinâmico** e fornecer uma quantidade “líquida” de trabalho para as suas vizinhanças, enquanto recebe energia, por **transferência de calor**, de um **único reservatório térmico**.



# EXPLICAÇÃO DO ENUNCIADO DE KELVIN-PLANC

- Pela Primeira Lei:

$$W_{ciclo} = Q_{ciclo}$$

- Pelo enunciado de Kelvin-Planck:

$$W_{ciclo} \leq 0$$

- Finalmente:

$$Q_{ciclo} \leq 0$$

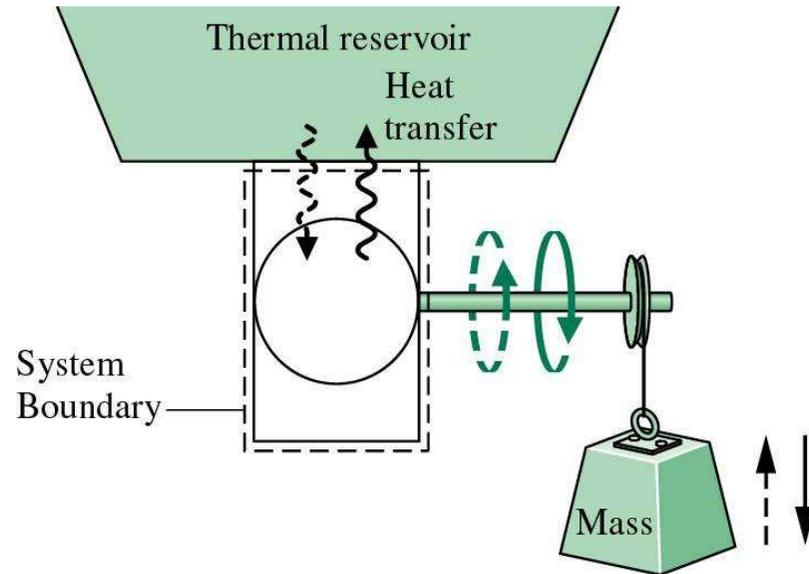
# IRREVERSIBILIDADES

- Um processo é chamado **irreversível** se o sistema e todas as partes que compõem suas vizinhanças não puderem ser **restabelecidos** exatamente aos seus respectivos estados **iniciais** após a ocorrência do processo;
- Um processo é **reversível** se tanto o sistema quanto suas vizinhanças **puderem retornar** aos seus estados **iniciais**.

# INTERPRETAÇÃO DO ENUNCIADO DE KELVIN-PLANK

RT é livre de irreversibilidades.

O Sistema massa-polia também.



Sistema percorrendo um ciclo enquanto troca energia (calor) com um único RT.

- Já que  $W_{\text{ciclo}} = 0$  (para não violar a segunda lei), não **haveria** variação líquida na altura da massa;
- Já que  $W_{\text{ciclo}} = Q_{\text{ciclo}}$ , segue-se que  $Q_{\text{ciclo}} = 0$ , logo não **haveria** variação líquida nas condições do reservatório térmico.

# TIPOS DE IRREVERSIBILIDADES

- Irreversibilidades **internas** ocorrem **dentro** do sistema;
- Irreversibilidades **externas** são aquelas que ocorrem nas vizinhanças (**fora** do sistema);

# EXEMPLOS DE IRREVERSIBILIDADES

- Transferência de calor através de uma diferença de temperatura;
- Expansões não resistidas;
- Reações químicas espontâneas;
- Misturas espontâneas;
- Atrito;
- Fluxo de corrente elétrica;
- Magnetização ou polarização por histerese;
- Deformação inelástica.

# DEMONSTRANDO IRREVERSIBILIDADES

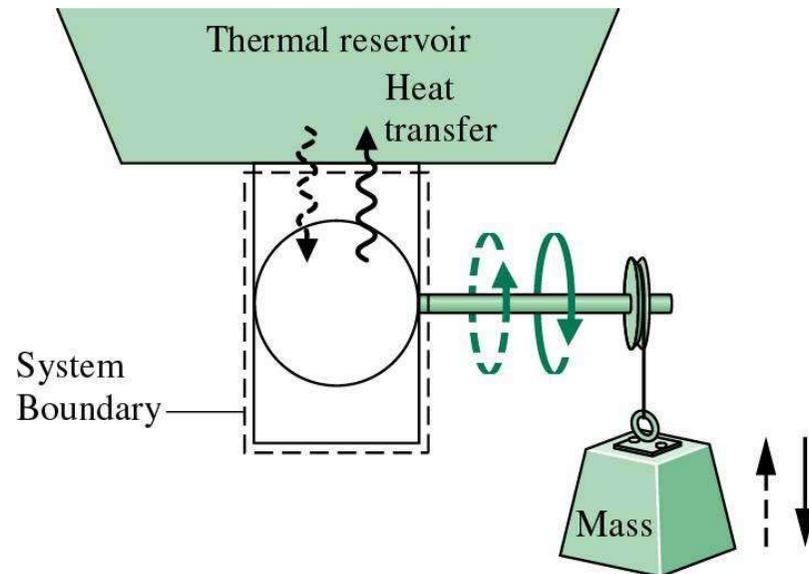
- Faz-se uso da seguinte **metodologia**:
  - Supõe-se que **há uma maneira** de retornar o sistema e suas vizinhanças a seus respectivos estados iniciais;
  - Mostra-se que, como consequência essa hipótese, seria **possível imaginar** um sistema que **produzisse trabalho** enquanto nenhum outro efeito ocorresse, além de uma **transferência de calor** de um um único reservatório térmico.

# INTERPRETAÇÃO DO ENUNCIADO DE KELVIN-PLANK

- Considere que no sistema da figura **não existem irreversibilidades**, logo o sistema retorna ao seu estado inicial ao final de um ciclo;

RT é livre de irreversibilidades.

O Sistema massa-polia também.



Sistema percorrendo um ciclo enquanto troca energia (calor) com um único RT.

# CONCLUSÕES DO ENUNCIADO DE KELVIN-PLANK

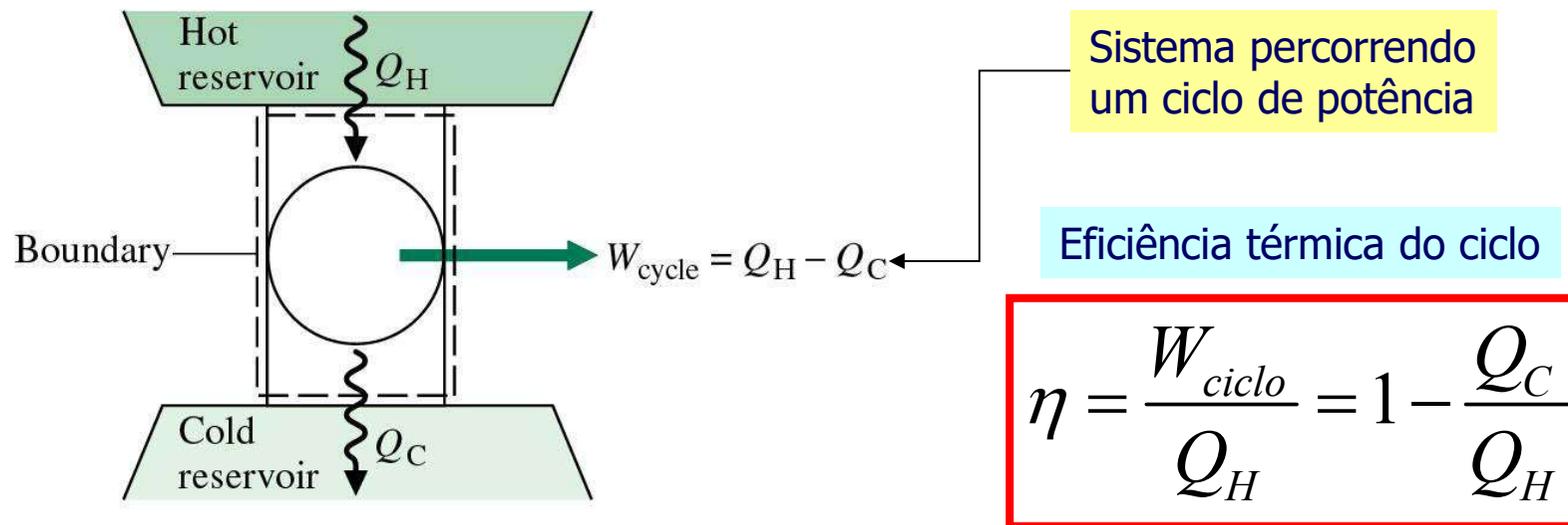
- Para sistemas executando um ciclo, **sem** irreversibilidades:

$$W_{ciclo} = 0$$

- Para sistemas executando um ciclo, **com** irreversibilidades:

$$W_{ciclo} < 0$$

# EFICIÊNCIA DE CICLOS DE POTÊNCIA

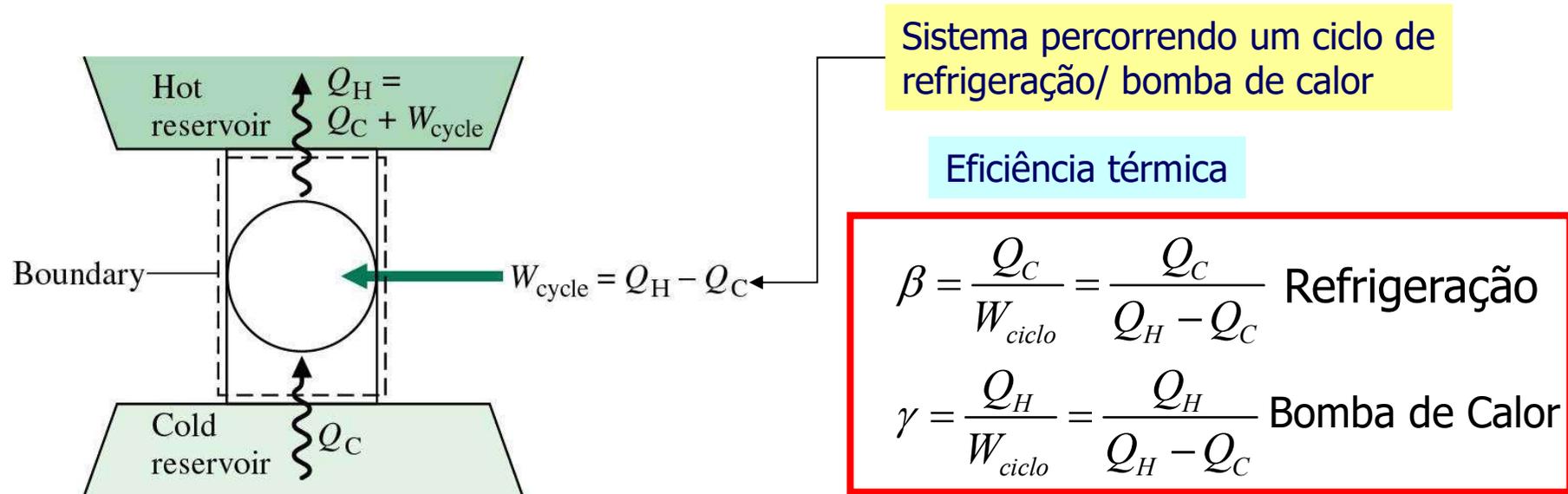


- Se **não houvesse** a transferência de calor para o reservatório frio, a eficiência seria de **100%**;
- Porém, sem o reservatório frio **viola-se** o enunciado de Kelvin-Planck;
- Decorre daí um **corolário de Carnot**, que diz: **todos** os ciclos de potência têm eficiência **menor** que 100%.

## COROLÁRIO DE CARNOT PARA CICLOS DE POTÊNCIA

- A eficiência térmica de um ciclo de potência irreversível é sempre menor do que a eficiência térmica de um ciclo de potência reversível quando cada um opera entre os mesmos dois reservatórios térmicos;
- Todos os ciclos de potência reversíveis operando entre os mesmos dois reservatórios térmicos possuem a mesma eficiência térmica;

# EFICIÊNCIA DE REFRIGERAÇÃO/BOMBA DE CALOR



- Se **não houvesse** a necessidade do fornecimento de trabalho ao ciclo, os coeficientes de desempenho seriam **infinitos**;
- Porém sem o fornecimento de trabalho teríamos a **violação** do **enunciado de Clausius**;
- Segue daí um **Corolário**, que diz: **todos** os ciclos de refrigeração/ bomba de calor tem desempenho **finito**.

## COROLÁRIO PARA REFRIGERAÇÃO/BOMBA DE CALOR

- O coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração **irreversível** é **sempre menor** do que o coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração **reversível** quando cada um opera **entre os mesmos reservatórios térmicos**;
- **Todos os ciclos de refrigeração reversíveis** operando entre os mesmos dois reservatórios térmicos **possuem o mesmo coeficiente de desempenho**;
- O mesmo **vale** substituindo o termo Refrigeração por **Bomba de calor**.

# ESCALAS DE TEMPERATURAS TERMODINÂMICAS



$T_c$  = temperatura em Celsius  
 $T_k$  = temperatura em Kelvin  
 $T_F$  = temperatura em Fahrenheit

$$T_c = T_k - 273,15$$

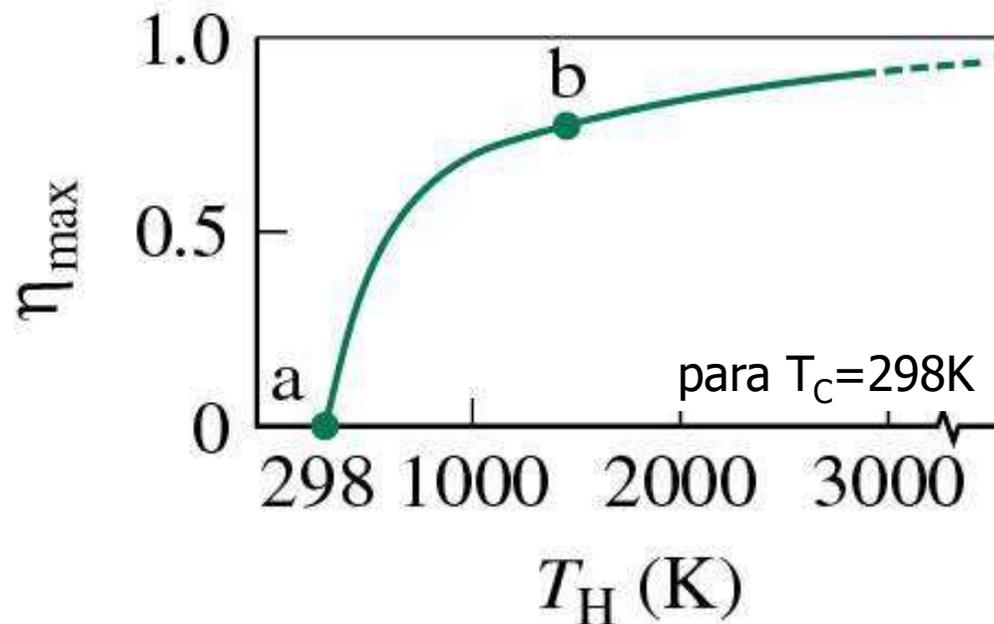
$$T_c = 5/9 (T_F - 32)$$

# EFICIÊNCIA MÁXIMA

- Para ciclos de potência:

Eficiência de Carnot

$$\eta_{m\acute{a}x} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$



De a para b: pequeno aumento em  $T_H$ , grande aumento na eficiência

Maior que b: torna-se muito oneroso aumentar a eficiência

# COEFICIENTE DE MÁXIMO DESEMPEÑO

- Para ciclos de refrigeração:

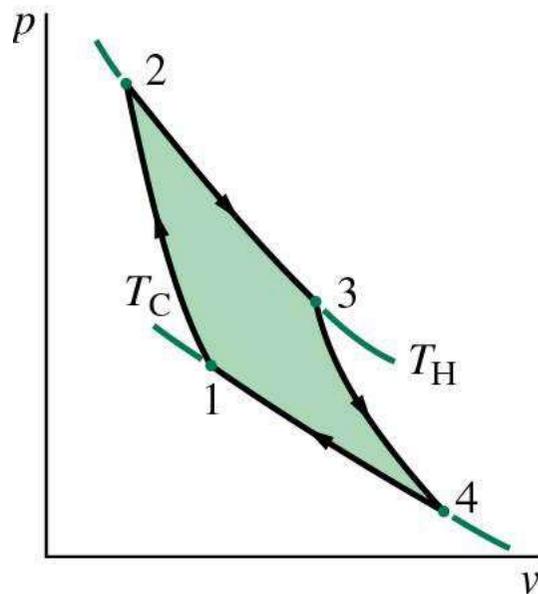
$$\beta_{m\acute{a}x} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

- Para bombas de calor:

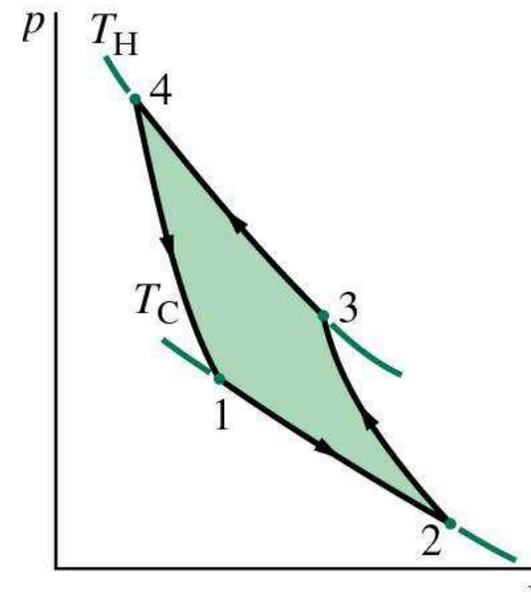
$$\gamma_{m\acute{a}x} = \frac{T_H}{T_H - T_C}$$

# CICLO DE CARNOT

- É um sistema que executa um **ciclo** em uma série de **quatro** processos **internamente reversíveis**: **dois** processos **adiabáticos** alternados com **dois** processos **isotérmicos**.

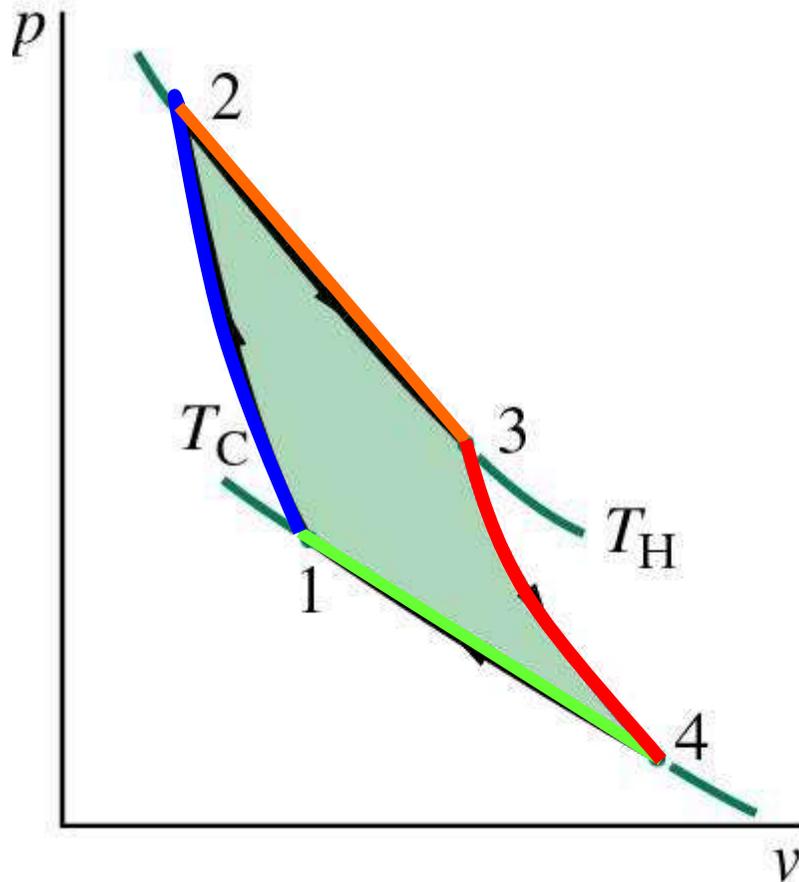


Ciclo de potência Carnot



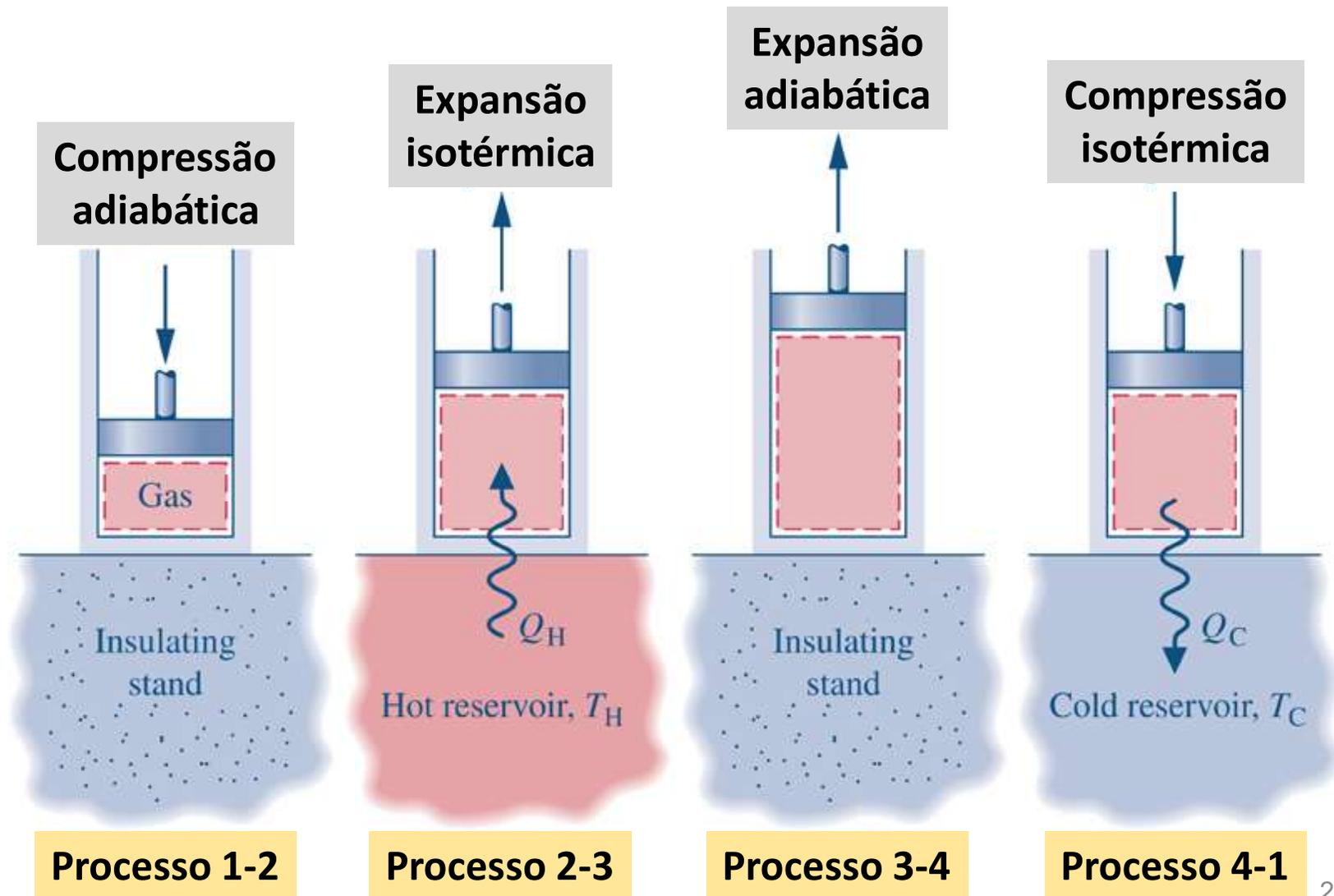
Ciclo de refrigeração/bomba de calor Carnot

# CICLO DE POTÊNCIA

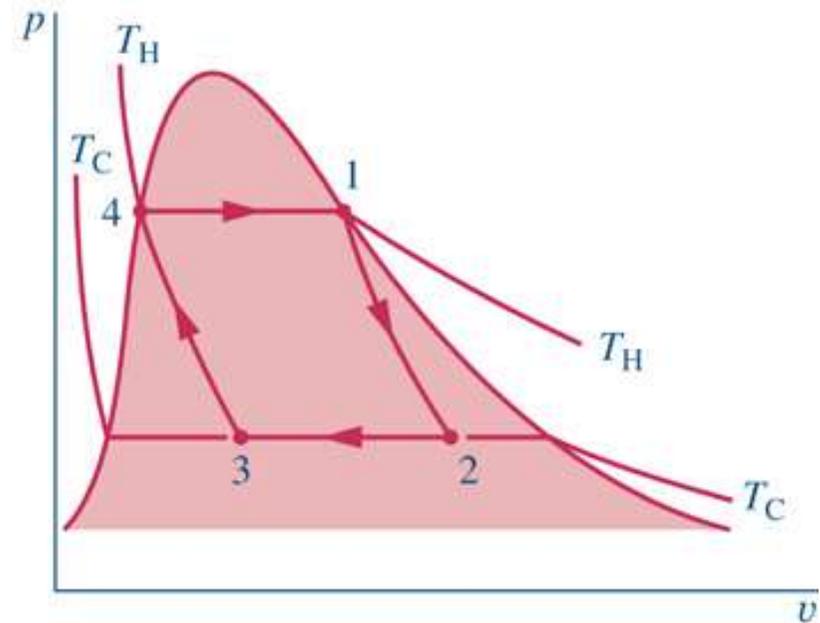
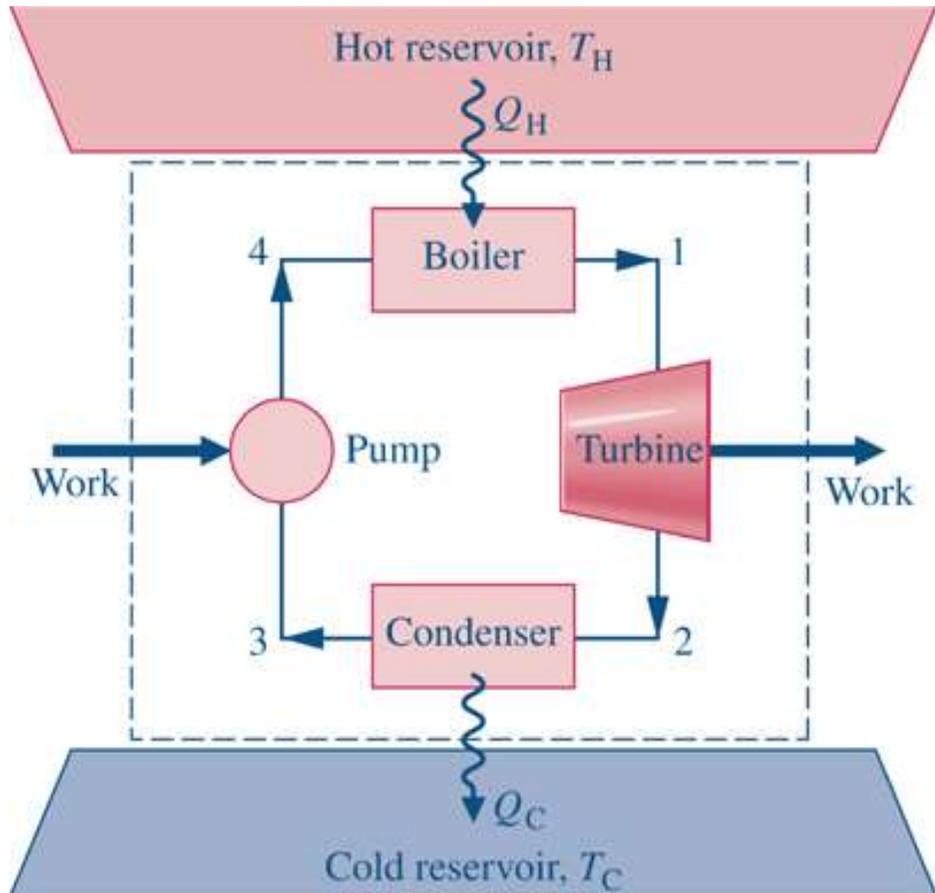


- 1-2: Compressão adiabática até 2, onde temperatura é  $T_h$ ;
- 2-3: Expansão isotérmica, recebendo energia do reservatório quente à  $T_h$ ;
- 3-4: Expansão adiabática até a temperatura cair para  $T_c$ ;
- 4-1: Compressão isotérmica, cedendo energia ao reservatório frio à  $T_c$ .

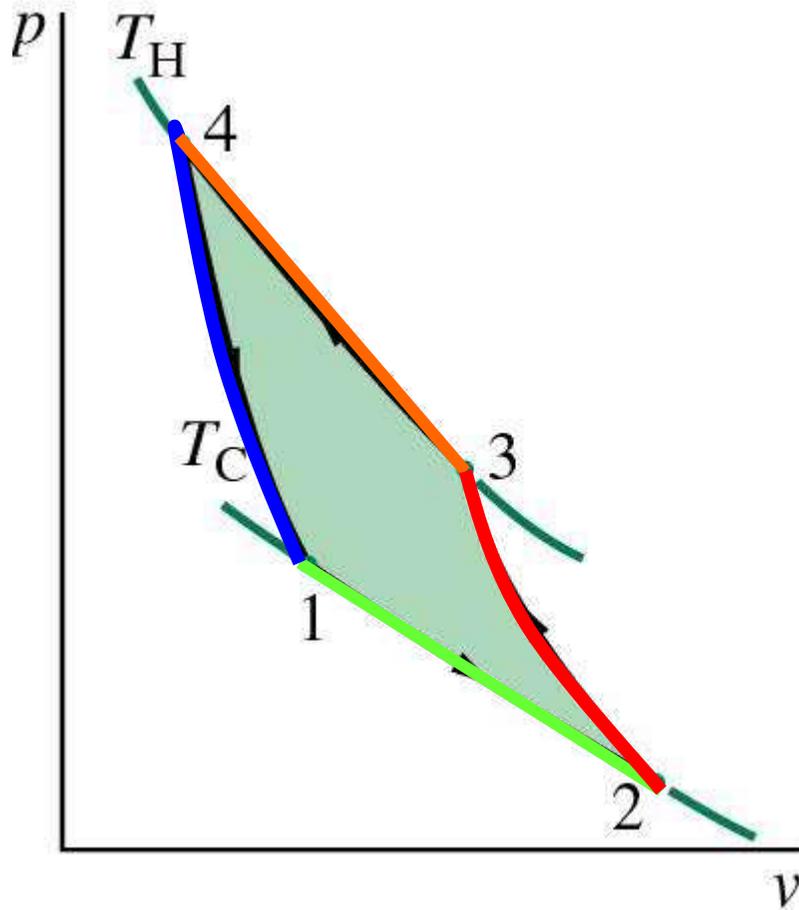
# CICLO DE POTÊNCIA EM CILINDRO -PISTÃO



# CICLO DE POTÊNCIA DE CARNOT A VAPOR



# CICLO DE REFRIGERAÇÃO/BOMBA DE CALOR



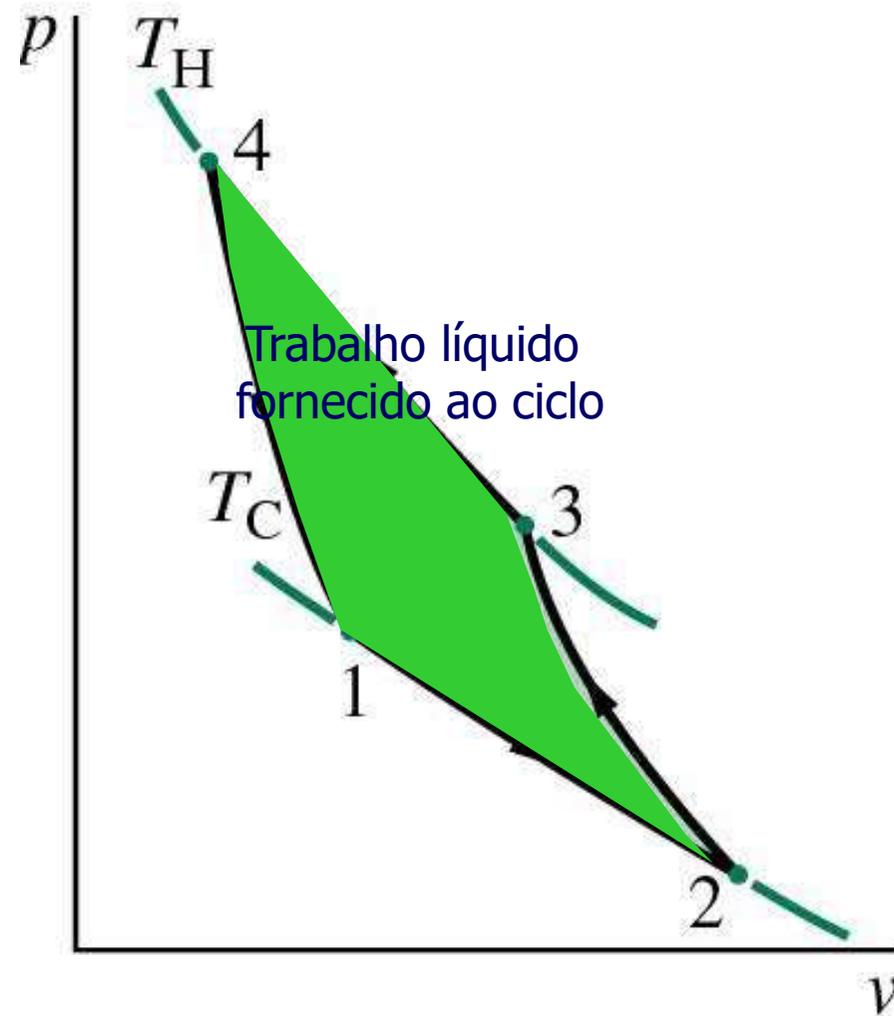
1-2: Expansão isotérmica, recebendo energia do reservatório frio à  $T_c$ ;

2-3: Compressão adiabática até atingir temperatura  $T_h$ ;

3-4: Compressão isotérmica, cedendo energia ao reservatório quente à  $T_h$ ;

4-1: Expansão adiabática até a temperatura cair para  $T_c$ .

# CICLO DE REFRIGERAÇÃO/BOMBA DE CALOR



## **3ª LEI DA TERMODINÂMICA**

**“Uma substância pura e cristalina na temperatura do zero absoluto possui ENTROPIA igual a zero”**