Termodinâmica I

1° Semestre/2020

Professor: Valter Salles do Nascimento Jr
email: nascimento.valter@usp.br

9° Semanas

- Ciclo de Carnot e Desigualdade de Clausius / Definições de variação de entropia / Variação de entropia para uma substância incomp. / Variação de entropia de um gás ideal

fevereiro

d	s	t	q	q	s	s
26	27	28	29	30	31	1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
1	2	3	4	5	6	7

24 - Carnaval

março

d	s	t	q	q	s	s
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11

Suspensão das aulas presenciais

23 - Orientações sobre EaD

abril

d	s	t	q	q	s	s
29	30	31	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	1	2
3	4	5	6	7	8	9

06 e 09 - Semana Santa

16 - Não houve aula

20 - Tiradentes

maio

d	s	t	q	q	s	s
26	27	28	29	30	1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31	1	2	3	4	5	6

junho

d	s	t	q	q	s	s
31	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11

11 - Corpus Chisti

julho

d	s	t	q	q	s	s
28	29	30	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	1
2	3	4	5	6	7	8

Período para realização de recuperação

Plano de ensino pretendido

30/04 04/05	Processos Reversíveis e Irreversíveis / Corolários: 2° Lei para Ciclos Termodinâmicos / Escalas de temperatura Kelvin e internacional / Desempenho máx. para ciclos entre 2 reservat.
07/05 11/05	Ciclo de Carnot e Desigualdade de Clausius / Definições de variação de entropia / Variação de entropia para uma substância incomp. / Variação de entropia de um gás ideal
14/05 18/05	Variação de entropia em proc. Int. reversíveis / Balanço de entropia para sistemas fechados e para Volumes de controle / Processos isentrópicos
21/05 25/05	Eficiência isentrópica de turbinas, bocais, compressores e bombas / Calor e trab. em processos de esc. int. revers. em reg. Permanente
28/05 01/06	Prova 1 / Exergia / Balanço de exergia termomecânica para sistemas fechados
04/06 08/06	Exergia de escoamento / Balanço de exergia termomecânica para volumes de controle, Eficiência Exergética
15/06 18/06	Ciclos de potência
22/06 25/06	Ciclos de refrigeração
29/06 02/07	Prova 2 / Prova Substitutiva

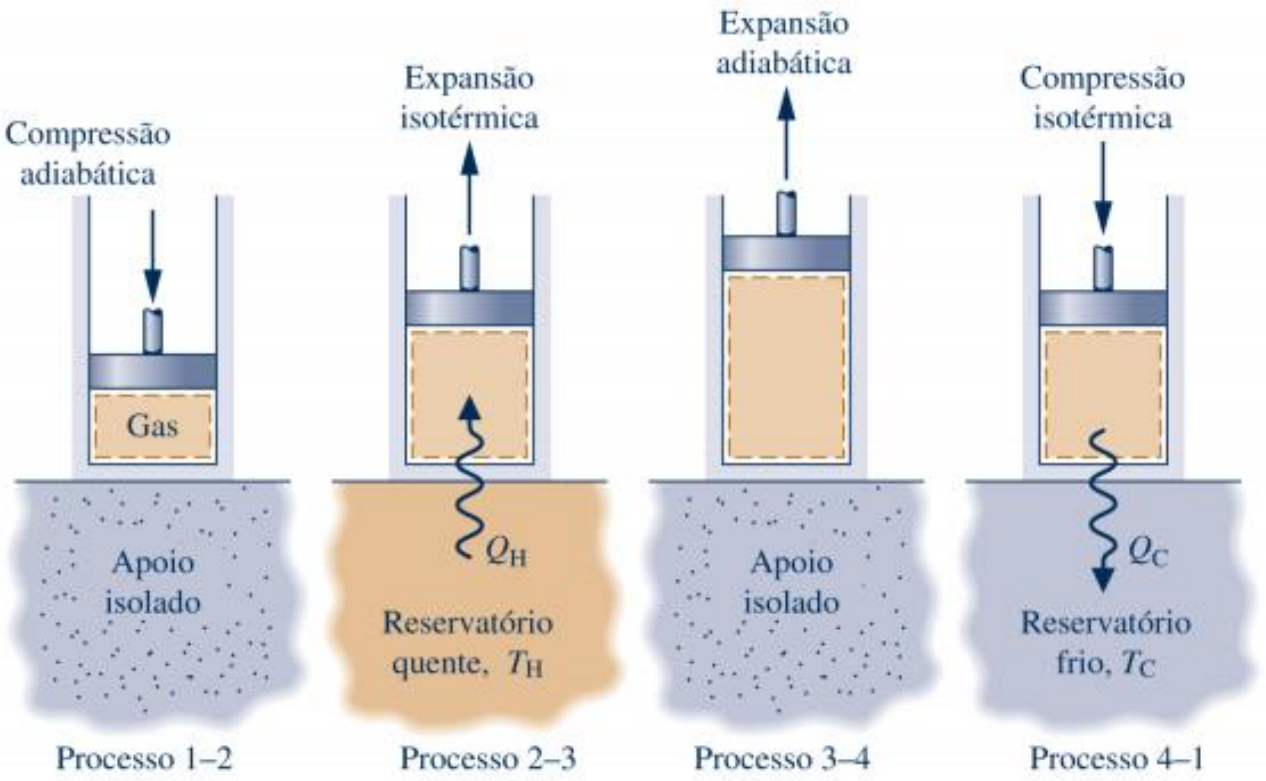
Ciclo de Carnot

- O ciclo de Carnot fornece exemplos específicos de ciclos reversíveis operando em dois reservatórios térmicos. (outros exemplos de ciclos reversíveis são o Ericsson e Stirling)
- O sistema que executa o ciclo passa por uma série de quatro processos internamente reversíveis: dois processos adiabáticos alternados com dois processos isotérmicos.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Ciclo de Potência a gás de Carnot

As paredes do pistão e do cilindro não são condutoras. As transferências de calor ocorrem no sentidos das setas, existem dois reservatórios T_C e T_H respectivamente



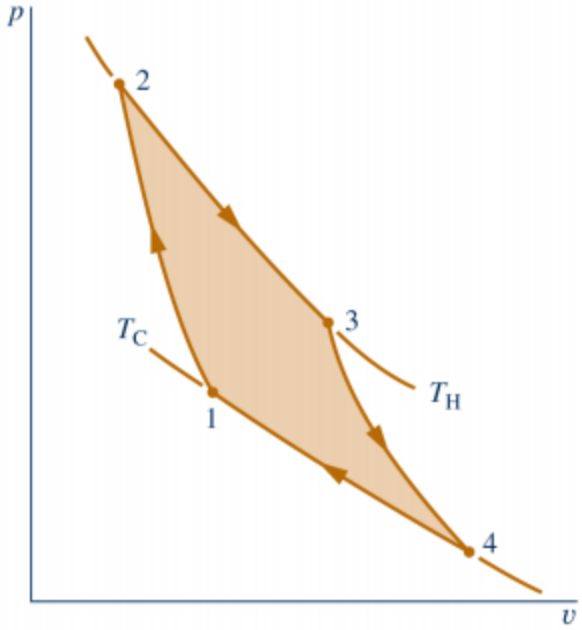
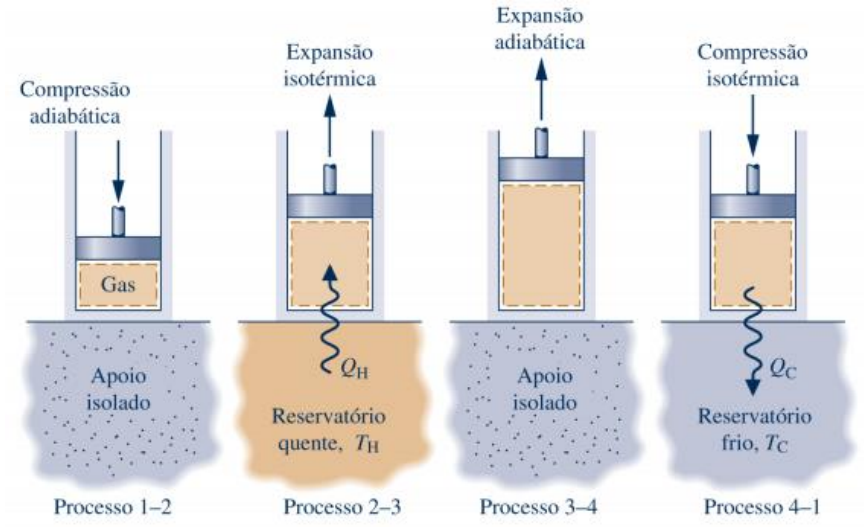


Fig. 5.13 Diagrama p–v para um ciclo de potência de Carnot realizado por um gás.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Ciclo de Potência a gás de Carnot

- **Processo 1-2**: o gás é comprimido adiabaticamente até o estado 2, no qual temperatura é T_H.
- **Processo 2-3:** o conjunto é colocado em contato com o reservatório a T_H. O gás se expande isotermicamente enquanto recebe a energia Q_H do reservatório quente por transferência de calor.
- **Processo 3-4:** o conjunto é colocado novamente sobre o apoio isolado e o gás continua a se expandir adiabaticamente até a temperatura cair para T_C.
- **Processo 4-1:** o conjunto é colocado em contato com o reservatório a T_C. O gás é comprimido isotermicamente até o seu estado inicial enquanto descarrega a energia QC para o reservatório frio por transferência de calor.



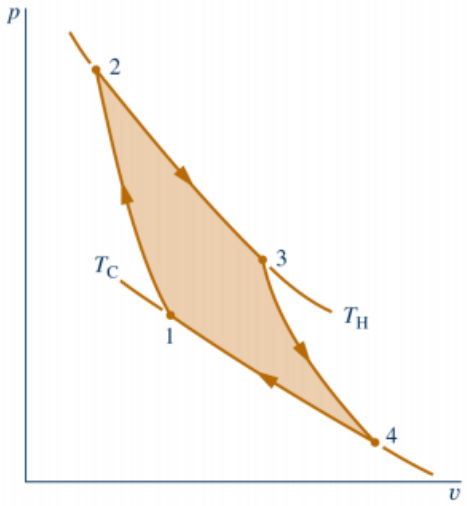
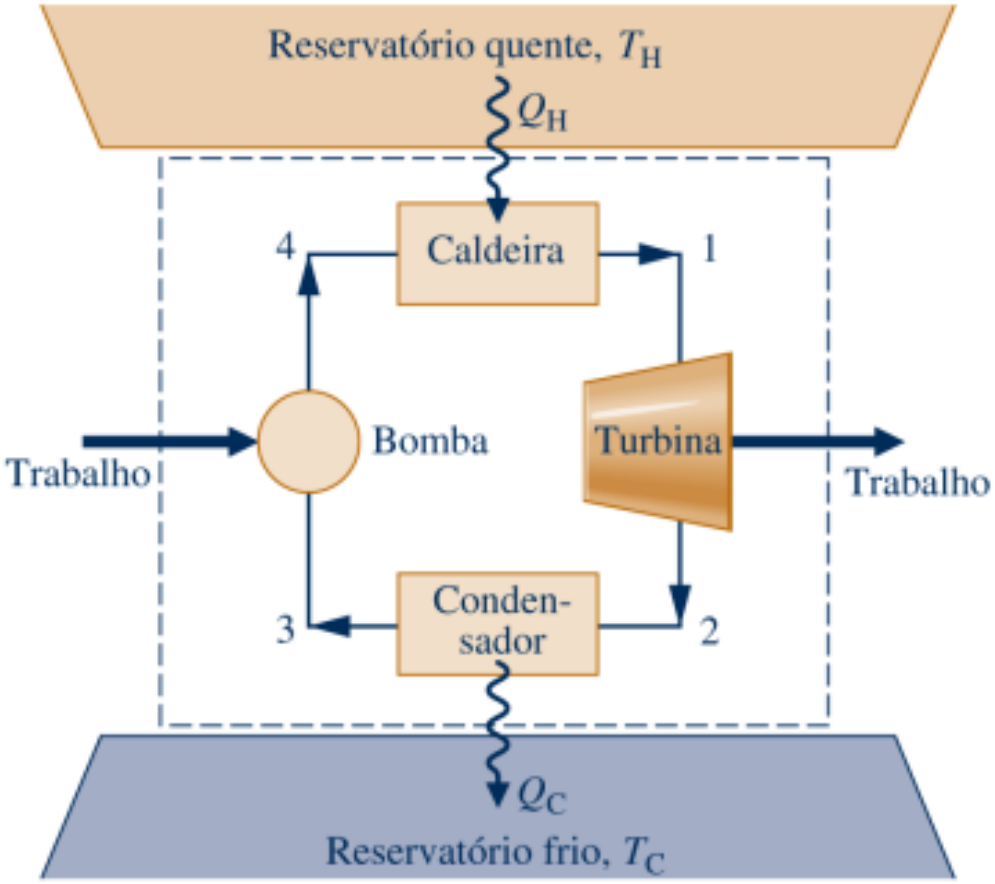
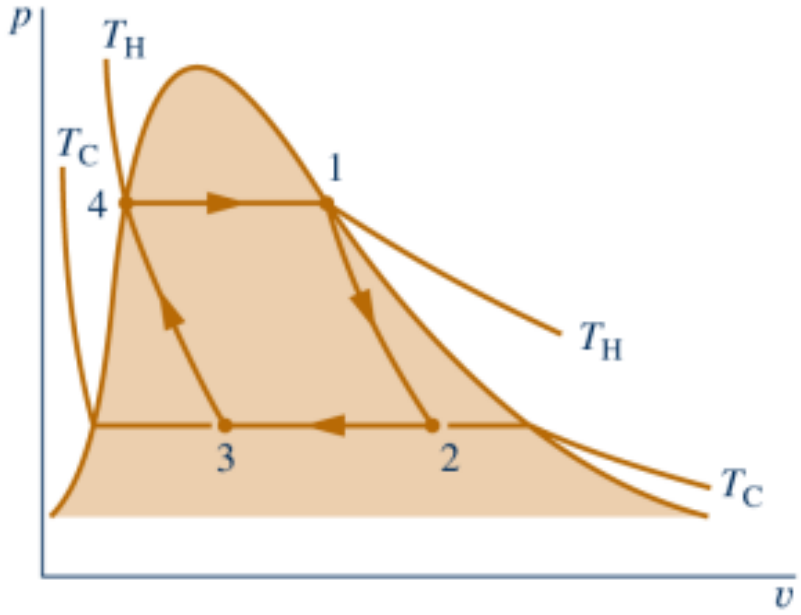


Fig. 5.13 Diagrama *p–v* para um ciclo de potência de Carnot realizado por um gás.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Ciclo de Potência a vapor de Carnot





* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Ciclo de Refr. ou B.C. de Carnot

Se um ciclo de Carnot for operado no sentido oposto, as magnitudes de todas as transferências de energia permanecem as mesmas, mas as transferências de energia estarão dirigidas de forma oposta, e esse ciclo pode ser considerado um ciclo de refrigeração ou bomba de calor reversível.

Um ciclo de refrigeração ou bomba de calor de Carnot executado por um gás em um conjunto cilindro-pistão consiste em quatro processos em série

Ciclo de Refr. ou B.C. de Carnot

- **Processo 1-2**: o gás se expande isotermicamente a TC enquanto recebe a energia QC do reservatório frio por transferência de calor.
- **Processo 2-3:** o gás é comprimido adiabaticamente até a sua temperatura atingir TH.
- **Processo 3-4:** o gás é comprimido isotermicamente a TH enquanto descarrega a energia QH no reservatório quente por transferência de calor.
- **Processo 4-1:** o gás se expande adiabaticamente até a sua temperatura decrescer para TC.

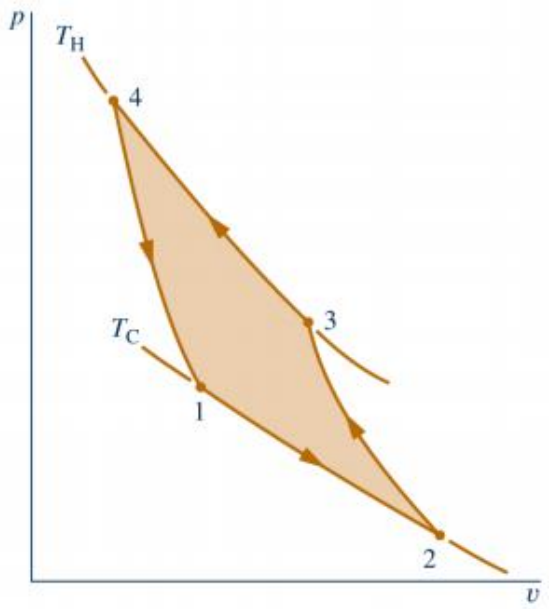


Fig. 5.16 Diagrama p–v para um ciclo de refrigeração ou bomba de calor de Carnot realizado por um gás.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Ciclo de Refr. ou B.C. de Carnot

- O ciclo de Carnot **sempre** apresenta os mesmos quatro processos **internamente reversíveis**: dois processos adiabáticos alternados com dois processos isotérmicos.
- A eficiência térmica do ciclos de potência de **Carnot** e o coeficiente de desempenho dos ciclos de refrigeração e bomba de calor de **Carnot** sempre serão avaliadas nas escalas de temperaturas Kelvin e Rankine

Ciclo de potência de Carnot:

$$\eta_r = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Ciclo de Refrigeração De Carnot:

$$\beta_r = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

Ciclo de bomba de calor de Carnot:

$$\gamma_r = \frac{T_H}{T_H - T_C}$$

Teorema de Clausius

Vimos, para motores operando entre 2 reservatórios, que

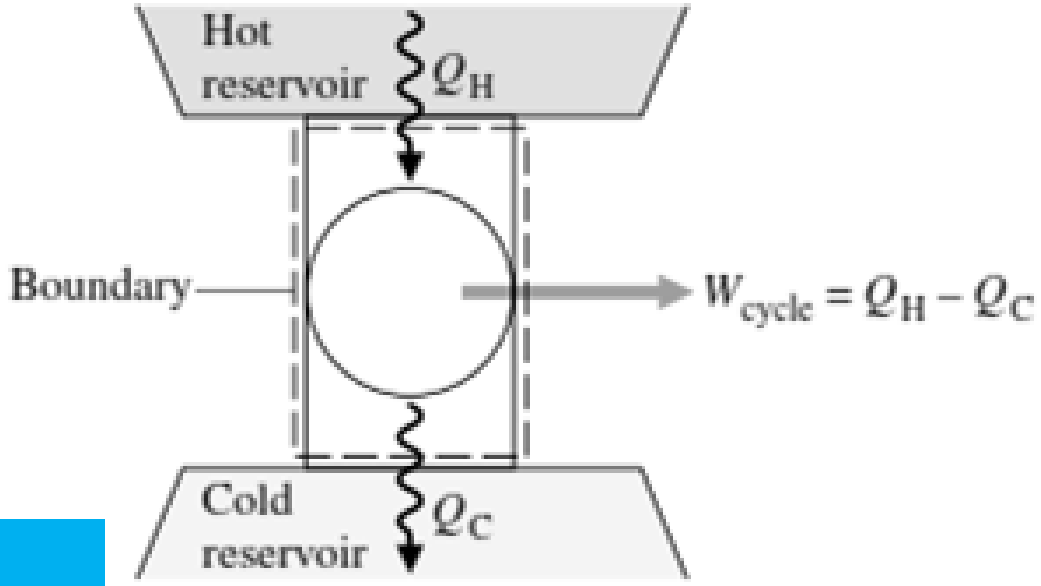
$\eta \leq \eta_r$ (Teorema de Carnot)!

$$1-\frac{Q_C}{Q_H} \leq 1-\frac{Q_{C,r}}{Q_{H,r}} = 1-\frac{T_C}{T_H}$$

$$\frac{Q_C}{Q_H} \geq \frac{Q_{C,r}}{Q_{H,r}} = \frac{T_C}{T_H}$$

$$\frac{Q_C}{T_C} \geq \frac{Q_H}{T_H}$$

$$\frac{Q_H}{T_H}-\frac{Q_C}{T_C} \leq 0 \Rightarrow \boxed{\sum_k \frac{Q_k}{T_k} \leq 0}$$



Teorema de Clausius

Generalizando, para qualquer ciclo,

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \leftarrow$$ Desigualdade de Clausius

Note que para um ciclo reversível

$$\oint \left.\frac{\delta Q}{T}\right|_r = 0 \qquad (*)$$

O Teorema de Clausius diz que: "Para qualquer sistema operando em um ciclo, $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$, onde a igualdade implica em um ciclo reversível"

Desigualdade de Clausius

$$\oint \left(\frac{\partial Q}{T}\right)_b \leq 0$$

Desigualdade de Clausius

$$\oint \left(\frac{\partial Q}{T}\right)_b = -\sigma_{ciclo}$$

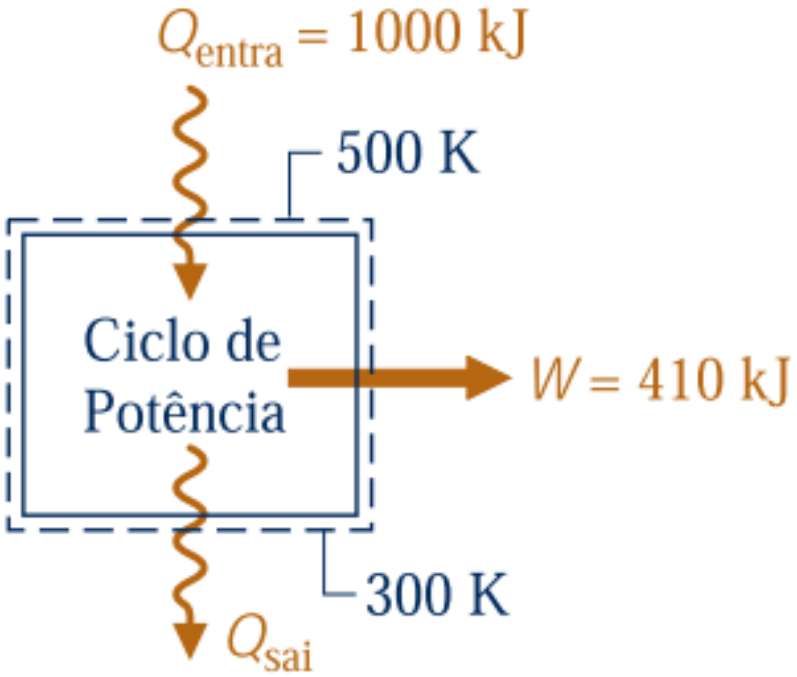
$\sigma_{ciclo} = 0$ $\quad \oint \frac{\delta Q}{T} = 0$ Ausência de irreversibilidades no sistema

$\sigma_{ciclo} > 0$ $\quad \oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$ Presença de irreversibilidades no sistema

$\sigma_{ciclo} < 0$ $\quad \oint \frac{\delta Q}{T} \geq 0$ Impossível

Exemplo 5.1 (Ciclo de potência)

Um inventor alega ter desenvolvido um ciclo de potência capaz de fornecer uma saída líquida de trabalho de 410 kJ por meio de uma entrada de energia por transferência de calor de 1000 kJ. O sistema percorrendo o ciclo recebe a transferência de calor de gases quentes à temperatura de 500 K e descarrega energia por transferência de calor para a atmosfera a 300 K. Avalie essa afirmação.

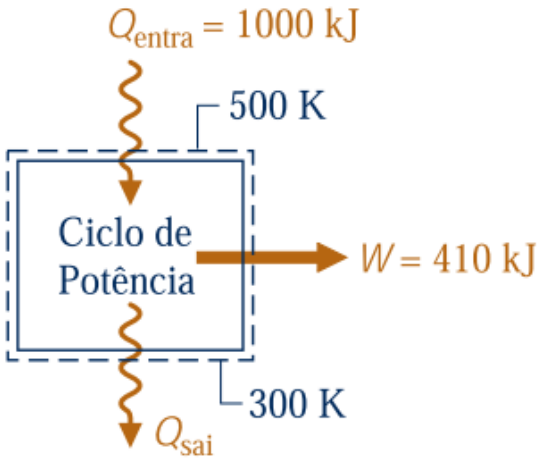


* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exemplo 5.1 (Ciclo de potência)

Usando os valores fornecidos pelo inventor, a eficiência térmica do ciclo é:

$$\eta = \frac{410\ kJ}{1000\ kJ} = 0{,}41\ (41\%)$$



A eficiência térmica máxima do ciclo é obtida através das temperaturas entre os reservatórios térmicos:

$$\eta_{máxima} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{300\ K}{500\ K} = 0{,}40\ (40\%)$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exemplo 5.1 (Ciclo de potência)

Aplicando a Eq. 5.13 ao ciclo do Exemplo 5.1

$$\oint \left(\frac{\partial Q}{T}\right)_b = -\sigma_{ciclo}$$

$$\oint \left(\frac{\partial Q}{T}\right)_b = \frac{Q_{entra}}{T_H} - \frac{Q_{sai}}{T_C} = -\sigma_{ciclo}$$

$$\frac{Q_{entra}}{T_H} - \frac{Q_{sai}}{T_C} = \frac{1000kJ}{500\ K} - \frac{590kJ}{300\ K} = 0{,}033\ kJ/K$$

$$\sigma_{ciclo} = -0{,}033\ kJ/K$$ Impossível

Exemplo 5.83

Um sistema executa um ciclo de potência enquanto recebe 1000 kJ por transferência de calor a uma temperatura de 500 K e descarrega energia por transferência de calor a uma temperatura de 300 K. Não ocorrem outras trocas de calor. Aplicando a Eq. 5.13, determine σ_{ciclo} se a eficiência térmica é (a) 100%, (b) 40%, (c) 30%. Identifique os casos (se existirem) que sejam internamente reversíveis ou impossíveis.

$$\oint \left(\frac{\partial Q}{T}\right)_b = -\sigma_{ciclo}$$

$\sigma_{ciclo} = 0$ $\quad \oint \frac{\delta Q}{T} = 0$ Ausência de irreversibilidades no sistema

$\sigma_{ciclo} > 0$ $\quad \oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$ Presença de irreversibilidades no sistema

$\sigma_{ciclo} < 0$ $\quad \oint \frac{\delta Q}{T} \geq 0$ Impossível

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exemplo 5.83

Um sistema executa um ciclo de potência enquanto recebe 1000 kJ por transferência de calor a uma temperatura de 500 K e descarrega energia por transferência de calor a uma temperatura de 300 K. Não ocorrem outras trocas de calor. Aplicando a Eq. 5.13, determine σ_{ciclo} se a eficiência térmica é (a) 100%, (b) 40%, (c) 30%. Identifique os casos (se existirem) que sejam internamente reversíveis ou impossíveis.

$$\frac{1000\ kJ}{500\ K} - \frac{Q_c}{300\ K} = -\sigma_{ciclo}$$

$$\sigma_{ciclo} = \frac{Q_c}{300\ K} - \frac{1000\ kJ}{500\ K}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_H}$$

$$Q_c = (1 - \eta) Q_H$$

a) $Q_c = 0\ kJ$ $\quad \sigma_{ciclo} = -2\ kJ/K$

b) $Q_c = 600\ kJ$ $\quad \sigma_{ciclo} = 0\ kJ/K$

c) $Q_c = 700\ kJ$ $\quad \sigma_{ciclo} = 0{,}5\ kJ/K$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercício 5.85

Conforme ilustrado na Fig. P5.85, um sistema executa um ciclo de potência enquanto recebe 750 kJ por transferência de calor a uma temperatura de 1500 K e descarrega 100 kJ por transferência de calor a uma temperatura de 500 K. Outra transferência de calor do sistema ocorre a uma temperatura de 1000 K. Usando a Eq. 5.13, determine a eficiência térmica se σ_{ciclo} é (a) 0 kJ/K, (b) 0,1 kJ/K, (c) 0,2 kJ/K, (d) 0,35 kJ/K.

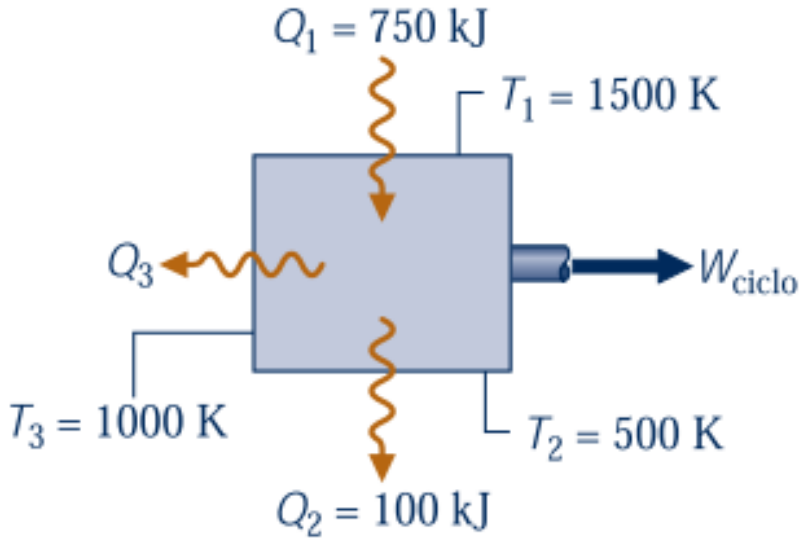
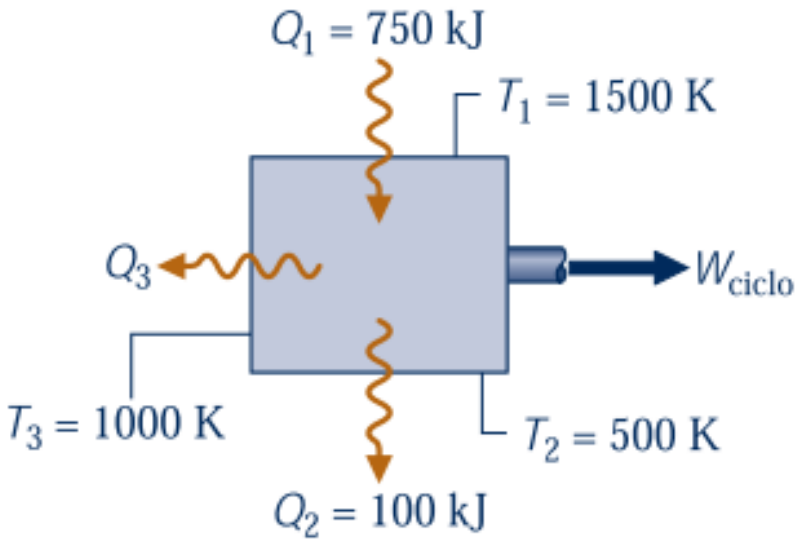


Fig. P5.85

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercício 5.85

Usando a Eq. 5.13, determine a eficiência térmica se σ_{ciclo} é (a) 0 kJ/K, (b) 0,1 kJ/K, (c) 0,2 kJ/K, (d) 0,35 kJ/K.



$$\frac{750\ kJ}{1500\ K} - \frac{100\ kJ}{500\ K} - \frac{Q_3}{1000\ K} = -\sigma_{ciclo}$$

$$Q_3 = 1000\left(\frac{750\ kJ}{1500\ K} - \frac{100\ kJ}{500\ K} + \sigma_{ciclo}\right)$$

$$a)\ \sigma_{ciclo} = 0\ kJ/K$$

$$b)\ \sigma_{ciclo} = 0{,}1\ kJ/K$$

$$c)\ \sigma_{ciclo} = 0{,}2\ kJ/K$$

$$d)\ \sigma_{ciclo} = 0{,}35\ kJ/K$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_2 + Q_3}{Q_1}$$

- (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Definição de variação de Entropia

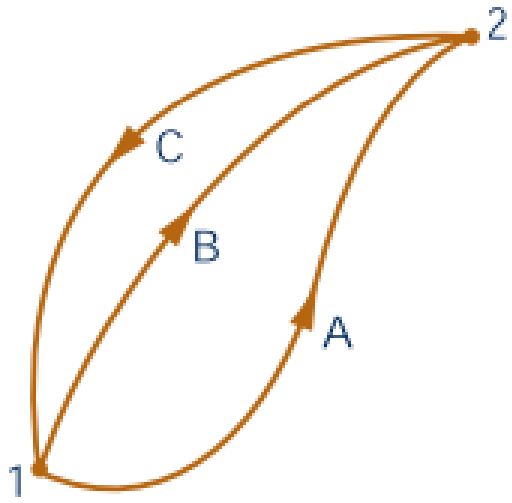


Fig. 6.1 Dois ciclos internamente reversíveis.

$$\left(\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}\right)_A + \left(\int_2^1 \frac{\delta Q}{T}\right)_C = -\sigma_{ciclo} \rightarrow 0$$

$$\left(\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}\right)_B + \left(\int_2^1 \frac{\delta Q}{T}\right)_C = -\sigma_{ciclo} \rightarrow 0$$

$$\boxed{\left(\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}\right)_A = \left(\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}\right)_B}$$

$$\boxed{S_2 - S_1 = \left(\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}\right)_{int.rev.} \quad \rightarrow \quad dS = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{int.rev.}}$$

$$\boxed{s = (1-x)s_f + xs_g \qquad s = s_f + x(s_g - s_f)}$$

- (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Gráficos de Entropia

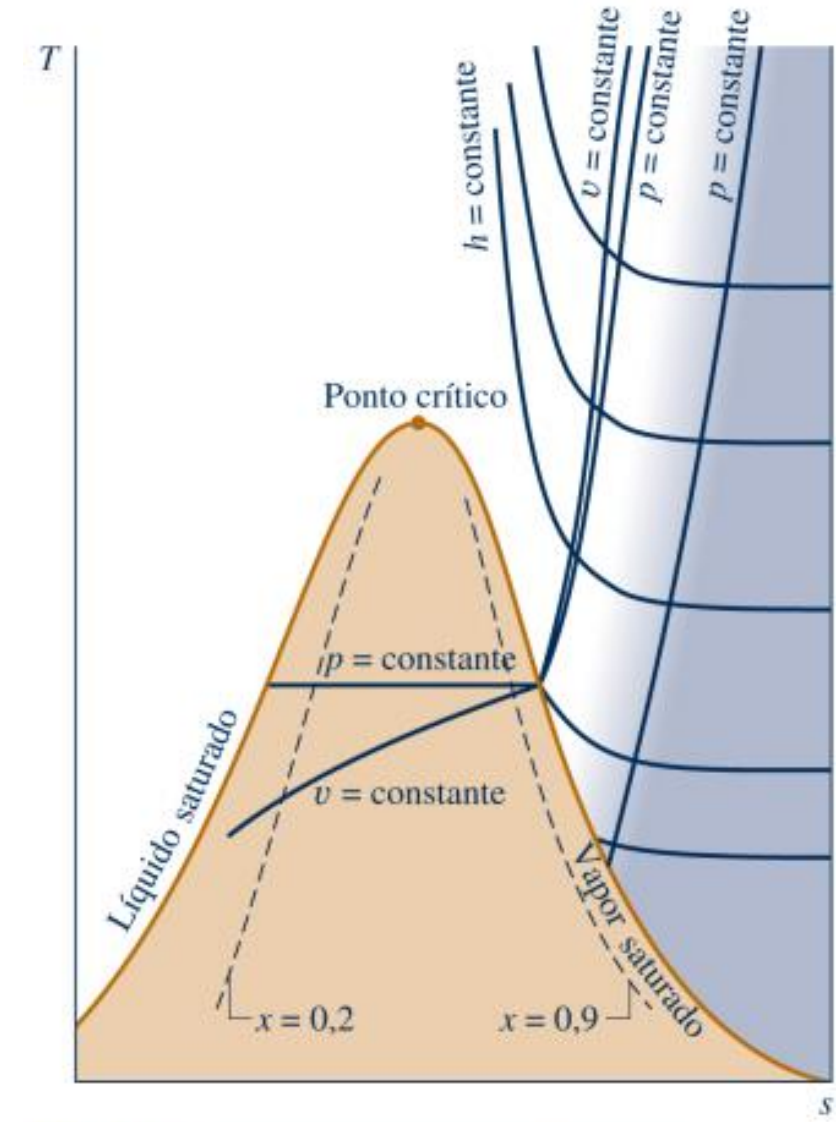


Fig. 6.2 Diagrama temperatura-entropia.

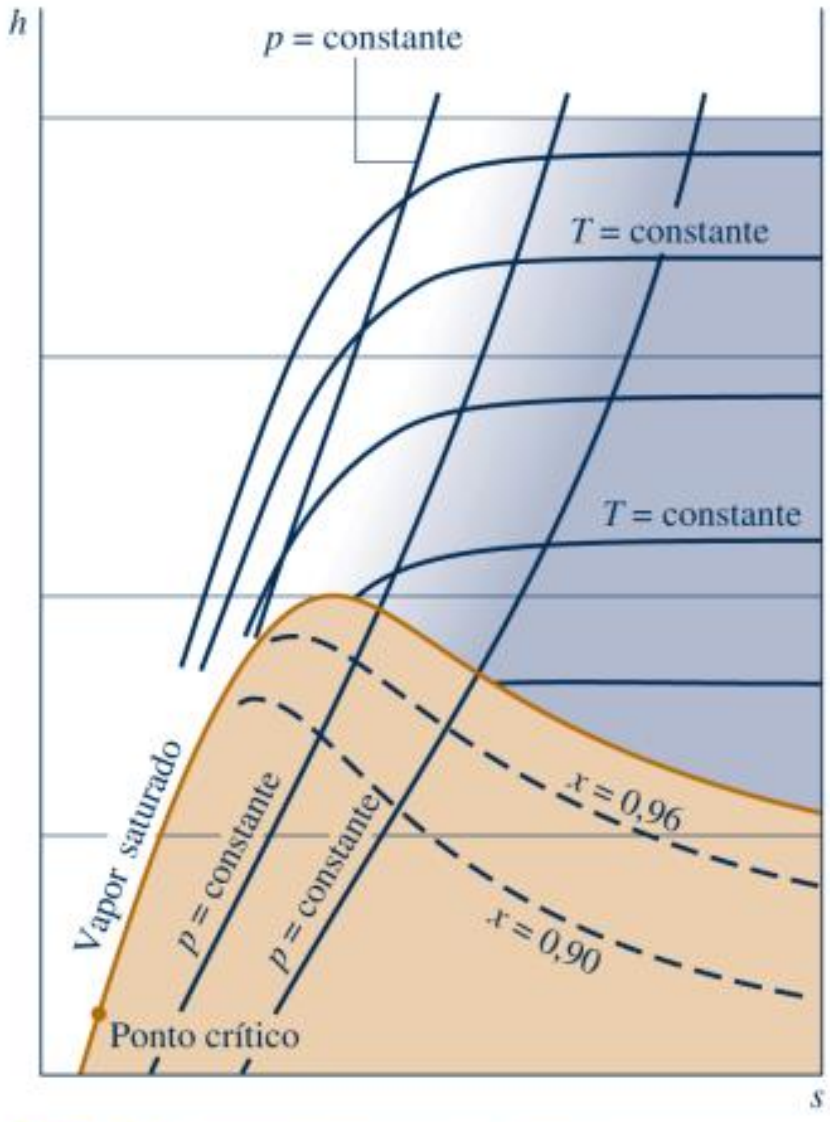


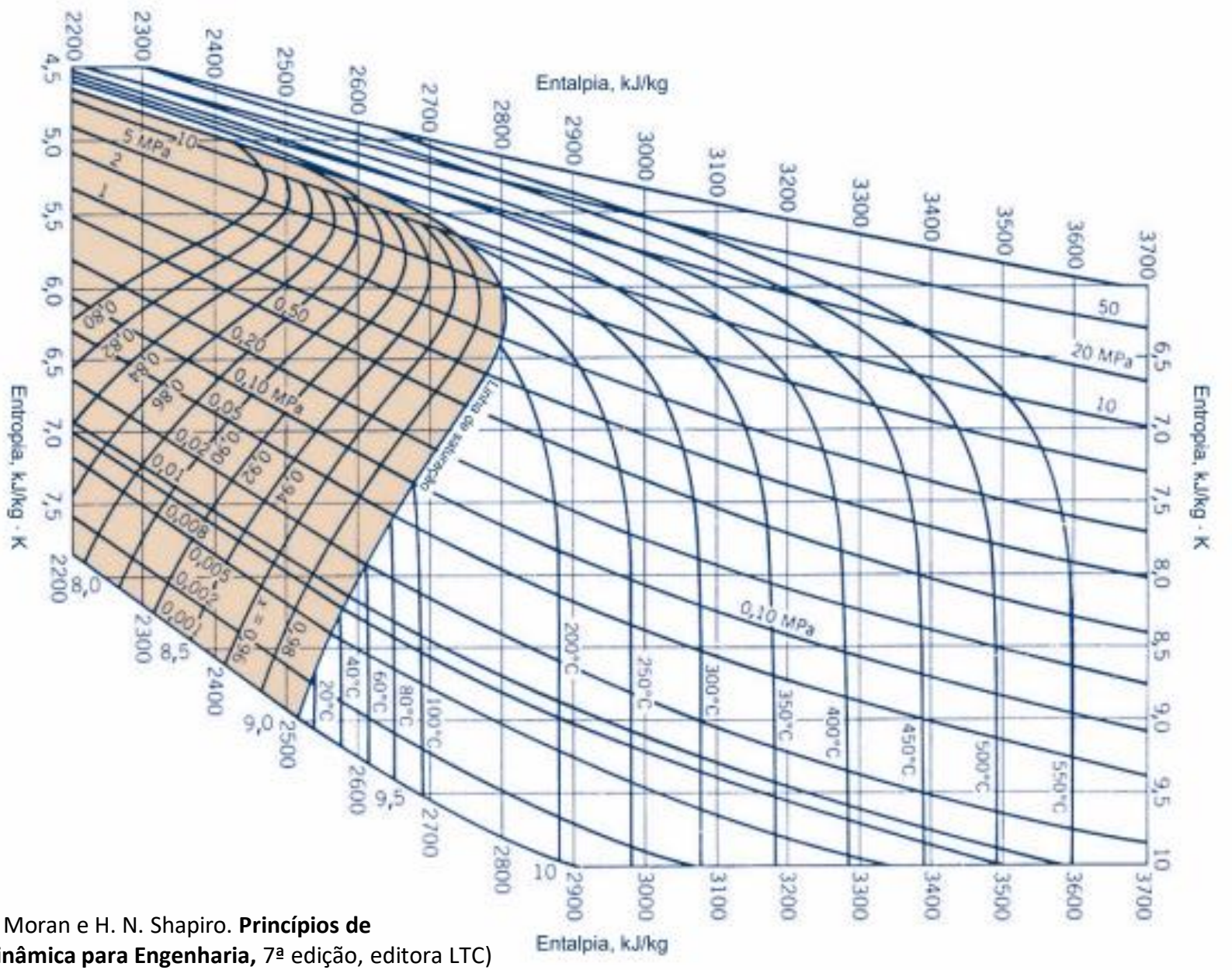
Fig. 6.3 Diagrama entalpia-entropia.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exemplo

POR EXEMPLO: para ilustrar a utilização do diagrama de Mollier em unidades SI, considere dois estados da água. No estado 1, T_1 = 240°C, p_1 = 0,10 MPa. A entalpia específica e o título são necessários no estado 2, em que p_2 = 0,01 MPa e $s_2 = s_1$. Utilizando a Fig. A-8, o estado 1 está localizado na região de vapor superaquecido. Traçando uma linha vertical na direção da região bifásica líquido-vapor, o estado 2 é localizado. O título e a entalpia específica no estado 2 obtidos da figura apresentam boa concordância com os valores obtidos utilizando as Tabelas A-3 e A-4: x_2 = 0,98 e h_2 = 2537 kJ/kg.

Para ilustrar a utilização do diagrama de Mollier em unidades SI, considere dois estados da água. No estado 1, T_1 = 240°C, p_1 = 0,10 MPa. A entalpia específica e o título são necessários no estado 2, em que p_2 = 0,01 MPa e $s_2 = s_1$.



- (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercícios Cap. 6

6.10 Propano é submetido a um processo a partir de um estado 1, em que $p_1 = 1{,}4$ MPa e $T_1 = 60°C$, até um estado 2, em que $p_2 = 1{,}0$ MPa, durante o qual a variação da entropia específica é $s_2 - s_1 = -0{,}035$ kJ/kg · K. No estado 2, determine a temperatura, em °C, e a entalpia específica, em kJ/kg.

Tabelas do propano A16-A18

$$s_1 = f(p_1, T_1)$$

$$s_2 = s_1 - 0{,}035\ kJ/kg \cdot K$$

$$T_2 = f(p_2, s_2)$$

$$h_2 = f(p_2, s_2)$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Equações TdS

$$(\delta Q)_{\substack{int \\ rev}} = dU + (\delta W)_{\substack{int \\ rev}}$$

$$(\delta W)_{\substack{int \\ rev}} = \mathrm{pdV}$$

$$(\delta Q)_{\substack{int \\ rev}} = TdS$$

$$\boxed{TdS = dU + pdV}$$

1° Equação TdS

$$dH = dU + d(pV) = dU + pdV + Vdp$$

$$dU + pdV = dH - Vdp$$

$$\boxed{TdS = dH - Vdp}$$

2° Equação TdS

$$Tds = du + pdv$$

$$Tds = dh - vdp$$

$$Td\bar{s} = d\bar{u} + pd\bar{v}$$

$$Td\bar{s} = d\bar{h} - \bar{v}dp$$

“Revisão” Calores Específicos c_P e c_V

- Definição de capacidade térmica $C \equiv \frac{DQ}{dT}$

- Refere-se ao DQ de calor absorvido pelo sistema por uma variação dT de temperatura

Conhecer a dependência da capacidade calorífica de uma substância em função da temperatura traz informação de como ela “absorve” energia (mecanismo)

Dedução da capacidade específica a volume constante c_v:

Da 1° Lei

$$dU = DQ - PdV$$

Derivando em relação a temperatura

$$\frac{dU}{dT} = \frac{DQ}{dT} + P\frac{dV}{dT}$$

Por definição o volume é constante

$$\frac{dV}{dT} = 0$$

$$\left(\frac{DQ}{dT}\right)_V = \left(\frac{DU}{dT}\right)_V = c_V$$

“Revisão” Calores Específicos c_P e c_V

→ Dedução da capacidade específica a pressão constante c_P:

Do conceito de entalpia

$$H = U + PV$$

$$dH = dU + PdV + VdP$$

como

$$\mathrm{d}U = DQ - PdV$$

$$dH = dQ + VdP$$

$$\frac{dH}{dT} = \frac{DQ}{dT} + V\frac{dP}{dT}$$

Por definição a pressão é constante

$$\frac{dP}{dT} = 0$$

$$\left(\frac{DQ}{dT}\right)_P = \left(\frac{DH}{dT}\right)_P = c_P$$

Aproximação de propriedades para Líquidos

Aproximação para Líquidos Utilizando Dados de Líquido Saturado:

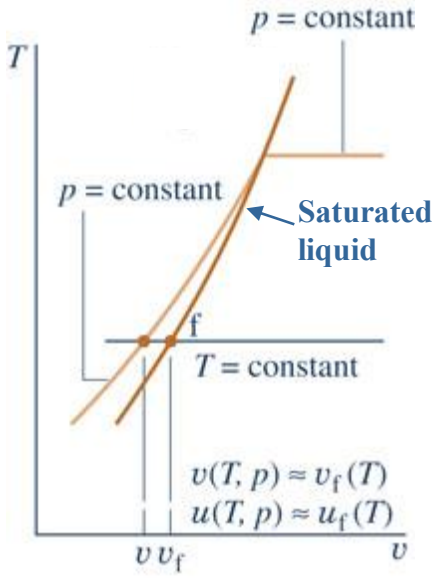
Podemos observar através da tabela A-5 (confira a Tabela A-5) para valores de líquido comprimido, que os valores de entalpia, volume específico, energia interna, e entropia específica são *aproximadamente* dependentes somente da temperatura, ou seja a pressão *não exerce muita influência* sobre esses valores.

Ou seja na falta de uma tabela para líquido comprimido, nós podemos estimar as propriedades (*v*, h, u, s) de *forma aproximada;* obtendo esses valores da tabela de saturação para a temperatura prescrita (independente da pressão)

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Aproximação de propriedades para Líquidos

- Valores Aproximados para v, u, e h no estado líquido podem ser obtidos de dados de líquido saturado.
- Desde que valores de v e u para líquidos mude muito pouco com a pressão ***na temperature fixada***, **as equações abaixo** podem ser usadas para estimar esse valor.



$$v(T,p) \approx v_f(T)$$
$$u(T,p) \approx u_f(T)$$

- Um valor aproxímado para h no estado líquido pode ser obtido das Eqs. de v e u da definição $h = u + pv$: $h(T,p) \approx u_f(T) + pv_f(T)$ ou de maneira alternativa: $h(T,p) \approx h_f(T) + \underline{v_f(T)[p - p_{sat}(T)]}$

onde p_{sat} é a pressão de saturação para a temperature dada

- Quando o termo sublinhado na Eq. de h é pequeno

$$h(T,p) \approx h_f(T)$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Aproximação de propriedades para Líquidos

- Para uma substância considerada *incompressível*
  - $v = \textbf{constante}$
  - $u = u(T)$
- Para uma substância imcompressível, $c_p = c_v$; o calor específico pode ser representado somente por c.
- Quando o calor específico é constante c:

$$u_2 - u_1 = c(T_2 - T_1)$$
$$h_2 - h_1 = c(T_2 - T_1) + \underline{v(p_2 - p_1)}$$

- Na de variação de h, assim como no ítem anterior se a diferença de pressão é pequena, essa parcela pode ser ignorada.

Modelo de subst. Incompressível (Entropia)

Para uma substância considerada *incompressível*

- $\boldsymbol{u = u(T)}$
- $\boldsymbol{v = \text{constant}}$

Equação $Tds = du + pdv$

pode ser rearranjada como $ds = \frac{du}{T} + \frac{pdv}{T}$

Para $v = cte;\ dv = 0$, assim, $ds = du/T$ e $du = c(T)dT$

$$ds = \frac{c(T)dT}{T} \quad \rightarrow \quad s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c(T)}{T} dT$$

Para uma substância imcompressível, $c_p = c_v$; o calor específico pode ser representado somente por c.

$$s_2 - s_1 = c\ ln\frac{T_2}{T_1}$$

Variação de Entropia de um Gás Ideal

Revisão do Modelo de Gás Ideal

Equações de estado:

$$pv = RT \tag{3.32}$$

$$pV = mRT \tag{3.33}$$

Variações de u e h:

$$u(T_2) - u(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T)\,dT \tag{3.40}$$

$$h(T_2) - h(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T)\,dT \tag{3.43}$$

Calores Específicos Constantes

$$u(T_2) - u(T_1) = c_v(T_2 - T_1) \tag{3.50}$$

$$h(T_2) - h(T_1) = c_p(T_2 - T_1) \tag{3.51}$$

Veja os dados para c_v e c_p nas Tabelas A-20, 21

Calores Específicos Variáveis

$u(T)$ e $h(T)$ são obtidos das Tabelas A-22 para o ar (base mássica) e das Tabelas A-23 para diversos outros gases (base molar).

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Variação de Entropia de um Gás Ideal

Equações TdS:

$$ds = \frac{du}{T} + \frac{p}{T}dv$$

$$ds = \frac{dh}{T} - \frac{v}{T}dp$$

Modelo de gás ideal

$$\begin{cases} du = c_v(T)dT \\ dh = c_p(T)dT \\ pv = RT \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} ds = c_v(T)\frac{dT}{T} + R\frac{dv}{v} \\ ds = c_p(T)\frac{dT}{T} - R\frac{dp}{p} \end{cases}$$

Integrando,

$$s(T_2, v_2) - s(T_1, v_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T)\frac{dT}{T} + Rln\frac{v_2}{v_1}$$

$$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T)\frac{dT}{T} - Rln\frac{p_2}{p_1}$$

Variação de Entropia de um Gás Ideal

$$c_p(T) = c_v(T) + R$$

TABLE A-21 Variation of $\bar{c}_p$ with Temperature for Selected Ideal Gases

$$\frac{\bar{c}_p}{\bar{R}} = \alpha + \beta T + \gamma T^2 + \delta T^3 + \varepsilon T^4$$

T is in K, equations valid from 300 to 1000 K

Gas	α	$\beta \times 10^3$	$\gamma \times 10^6$	$\delta \times 10^9$	$\varepsilon \times 10^{12}$
CO	3.710	−1.619	3.692	−2.032	0.240
CO_2	2.401	8.735	−6.607	2.002	0
H_2	3.057	2.677	−5.810	5.521	−1.812
H_2O	4.070	−1.108	4.152	−2.964	0.807
O_2	3.626	−1.878	7.055	−6.764	2.156
N_2	3.675	−1.208	2.324	−0.632	−0.226
Air	3.653	−1.337	3.294	−1.913	0.2763
SO_2	3.267	5.324	0.684	−5.281	2.559
CH_4	3.826	−3.979	24.558	−22.733	6.963
C_2H_2	1.410	19.057	−24.501	16.391	−4.135
C_2H_4	1.426	11.383	7.989	−16.254	6.749

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Variação de Entropia de um Gás Ideal

- Utilizando Tabelas de Gás Ideal

$$s^0(T) = \int_{T'}^{T} c_p(T)\frac{dT}{T}$$

$$\int_{T_1}^{T_2} c_p(T)\frac{dT}{T} = \int_{T'}^{T_2} c_p(T)\frac{dT}{T} - \int_{T'}^{T_1} c_p(T)\frac{dT}{T} \quad \Rightarrow \quad \int_{T_1}^{T_2} c_p(T)\frac{dT}{T} = s^0(T_2) - s^0(T_1)$$

$$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R\ln\frac{p_2}{p_1}$$

Tabelas A-22 e A-23

Variação de Entropia de um Gás Ideal

Exemplo: avaliemos a variação da entropia específica, em kJ/kg·K, para o ar admitido como gás ideal de um estado em que T_1=300 K e p_1=1 bar a um estado em que T_2=1000 K e p_2=3 bar.

$$s_2 - s_1 = s^\circ(T_2) - s^\circ(T_1) - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$= (2{,}96770 - 1{,}70203) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - \frac{8{,}314}{28{,}97} \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \ln \frac{3 \text{ bar}}{1 \text{ bar}}$$

$$= 0{,}9504 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Variação de Entropia de um Gás Ideal

- Assumindo Calores Específicos constantes

$$s(T_2, v_2) - s(T_1, v_1) = c_v ln \frac{T_2}{T_1} + R ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = c_p ln \frac{T_2}{T_1} - R ln \frac{p_2}{p_1}$$

A Tabela A-20 traz valores de c_p para o ar como gás ideal

Variação de Entropia de um Gás Ideal

Determinemos a variação da entropia específica, em kJ/kg·K, para o ar admitido como gás ideal submetido a um processo de T_1=300 K, p_1=1 bar para T_2=400 K, p_2=5 bar. Devido ao pequeno intervalo relativo de temperatura, admitimos um valor constante de c_p avaliado a 350 K.

Utilizando c_p=1,008 kJ/kg·K da Tabela A-20

$$\Delta s = c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R \ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$= \left(1{,}008\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)\ln\left(\frac{400\ \text{K}}{300\ \text{K}}\right) - \left(\frac{8{,}314}{28{,}97}\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)\ln\left(\frac{5\ \text{bar}}{1\ \text{bar}}\right)$$

$$= -0{,}1719\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercício

6.16 Argônio em um conjunto cilindro-pistão é comprimido de um estado 1, em que $T_1 = 300$ K e $V_1 = 1$ m^3, até um estado 2, em que $T_2 = 200$ K. Considerando que a variação da entropia específica é $s_2 - s_1 = -0{,}27$ kJ/kg · K, determine o volume final, em m^3. Admita o modelo de gás ideal com $k = 1{,}67$.

Para um gás ideal

$$c_p(T) = c_v(T) + R$$

$$k = \frac{c_p(T)}{c_v(T)}$$

$$\begin{cases} c_p(T) = \dfrac{kR}{k-1} \\ c_v(T) = \dfrac{R}{k-1} \end{cases}$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercício

$$s(T_2, v_2) - s(T_1, v_1) = c_v ln\frac{T_2}{T_1} + R ln\frac{v_2}{v_1}$$

$$como:\ v = \frac{V}{m}$$

$$s(T_2, v_2) - s(T_1, v_1) = c_v ln\frac{T_2}{T_1} + R ln\frac{V_2}{V_1}$$

$$c_v(T) = \frac{R}{k-1} \qquad R = \frac{\bar{R}}{M} = \frac{8{,}314}{39{,}94}\left(\frac{kJ}{kg.K}\right)$$

$$s(T_2, v_2) - s(T_1, v_1) = -0{,}27\ kJ/kg.K$$

$$-0{,}27\ kJ/kg.K = \frac{\frac{8{,}314}{39{,}94}}{1{,}67-1} ln\frac{200}{300} + \frac{8{,}314}{39{,}94} ln\frac{V_2}{1}$$

$$V_2 = 0{,}5m^3$$

Exercício

6.17 Vapor entra em uma turbina operando em regime permanente a 1 MPa e 200°C, e sai a 40°C com um título de 83%. As perdas de calor e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Determine (a) o trabalho produzido pela turbina, em kJ por kg de vapor escoando, (b) a variação da entropia específica da admissão à descarga, em kJ/K por kg de vapor escoando.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercício

6.17 Vapor entra em uma turbina operando em regime permanente a 1 MPa e 200°C, e sai a 40°C com um título de 83%. As perdas de calor e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Determine (a) o trabalho produzido pela turbina, em kJ por kg de vapor escoando, (b) a variação da entropia específica da admissão à descarga, em kJ/K por kg de vapor escoando.

a) $$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}\left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2)\right]$$

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

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

Tabela A2: $h_2 = h_f + x(h_g - h_f) = 167{,}57 + 0{,}83.(2406{,}7)$

$h_2 = 2165{,}1$ kJ/kg

Tabela A4: $h_1 = 2827{,}9$ kJ/kg

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = 662{,}8\ kJ/kg$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)

Exercício

6.17 Vapor entra em uma turbina operando em regime permanente a 1 MPa e 200°C, e sai a 40°C com um título de 83%. As perdas de calor e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Determine (a) o trabalho produzido pela turbina, em kJ por kg de vapor escoando, (b) a variação da entropia específica da admissão à descarga, em kJ/K por kg de vapor escoando.

b)

$$Tabela\ A2: \quad s_2 = s_f + \mathrm{x}(s_g - s_f) = 0{,}5720 + 0{,}83.(8{,}2570 - 0{,}5720)$$

$$s_2 = 6{,}9506\ \mathrm{kJ/kg}$$

$$Tabela\ A4: \quad s_1 = 6{,}6940\ \mathrm{kJ/kg}$$

$$(s_2 - s_1) = 0{,}2566\ kJ/kg$$

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia,** 7ª edição, editora LTC)