

Termo_Aplicada_P2_13082025

August 12, 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
Termodinâmica Aplicada – Prof. Fábio Magnani – 2ª avaliação – 13/08/2025

1ª Questão) Considere um Ciclo Rankine com Reaquecimento, operando nas pressões 10, 700 e 6000 kPa, com todas as máquinas de fluxo (i.g., bombas, turbinas) com eficiência isentrópica de 80%. Nas duas saídas da caldeira, a temperatura é 360 °C. Calcule o título na saída da turbina de alta pressão. (4,0 pontos)

2ª Questão) O dispositivo de expansão de um Ciclo de Refrigeração por Compressão a Vapor (R134a) opera entre as temperaturas 40 °C e 5 °C. Qual o COP (i.e. coeficiente de performance, coeficiente de desempenho) do ciclo? (3,0 pontos)

3ª Questão) O motor de um avião (Ciclo Brayton), aspira ar a 25 °C e 100 kPa e tem uma relação de pressão de 10:1. Qual a temperatura na entrada da câmara de combustão? (3,0 pontos)

1 Utilitários: Propriedades Termodinâmicas e Eficiências Isentrópicas

Esta seção documenta as funções auxiliares desta célula para (i) obter propriedades via **CoolProp** e (ii) calcular estados de saída de **turbinas** e **compressores** com eficiência isentrópica. Inclui também relações de gás ideal para ar (modelo ar-padrão).

Dependências e unidades (SI, PropsSI): (T) em K, (p) em Pa, (h) em J/kg, (s) em J/(kg · K). Se **CoolProp** não estiver disponível, use tabelas/valores manuais.

1.1 Turbina — eficiência isentrópica e entalpia de saída

Definição da eficiência isentrópica da turbina:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_{2,\text{real}}}{h_1 - h_{2s}},$$

onde $h_{2s} = h(p_2, s_1)$ é a entalpia de saída **isentrópica** (mesma entropia da entrada, pressão de saída).

Rearranjo para a entalpia real de saída:

$$h_{2,\text{real}} = h_1 - \eta_t (h_1 - h_{2s}).$$

1.2 Compressor — eficiência isentrópica e entalpia de saída

Definição da eficiência isentrópica do compressor:

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2,\text{real}} - h_1}.$$

Rearranjo:

$$h_{2,\text{real}} = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_c}.$$

1.3 Relações de gás ideal para o ar (modelo ar-padrão)

Defina a razão de pressões ($r_p = p_2/p_1$) e o expoente de expansão isentrópica (γ).

Transformação isentrópica ideal:

$$T_{2s} = T_1 r_p^{(\gamma-1)/\gamma}.$$

Compressor com eficiência em temperaturas:

$$\eta_c = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \Rightarrow T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_c}.$$

```
[11]: # Utilities (optional)
# - Tries to import CoolProp for water and R134a properties.
# - Helper functions for turbine/compressor isentropic efficiency.
try:
    from CoolProp.CoolProp import PropsSI
    HAS_COOLPROP = True
except Exception as e:
    HAS_COOLPROP = False
    print("CoolProp not found. Use tables or fill values manually. Error:", e)

def turbine_h_out(h_in, s_in, p_out, eta_is=1.0, fluid='Water'):
    # Turbine: eta_t = (h_in - h_out_real)/(h_in - h_out_is)
    if not HAS_COOLPROP:
        raise RuntimeError("CoolProp not available.")
    h2s = PropsSI('H','S',s_in,'P',p_out,fluid)
    h2 = h_in - eta_is*(h_in - h2s)
    return h2, {'h2s': h2s, 'h2': h2}

def compressor_h_out(h_in, s_in, p_out, eta_is=1.0, fluid='Air'):
    # Compressor: eta_c = (h_out_is - h_in)/(h_out_real - h_in)
    if not HAS_COOLPROP:
        raise RuntimeError("CoolProp not available.")
    h2s = PropsSI('H','S',s_in,'P',p_out,fluid)
    if eta_is <= 0:
        raise ValueError("eta_is must be > 0")
```

```

h2 = h_in + (h2s - h_in)/eta_is
return h2, {'h2s': h2s, 'h2': h2}

def T2_isentropic_air(T1, r_p, gamma=1.4):
    # Ideal-gas (air-standard): T2s = T1 * r_p^((gamma-1)/gamma)
    return T1 * (r_p**((gamma-1.0)/gamma))

def T2_with_eta_comp_air(T1, r_p, eta_c=1.0, gamma=1.4):
    # eta_c = (T2s - T1)/(T2 - T1) => T2 = T1 + (T2s - T1)/eta_c
    T2s = T2_isentropic_air(T1, r_p, gamma=gamma)
    return T1 + (T2s - T1)/eta_c, T2s

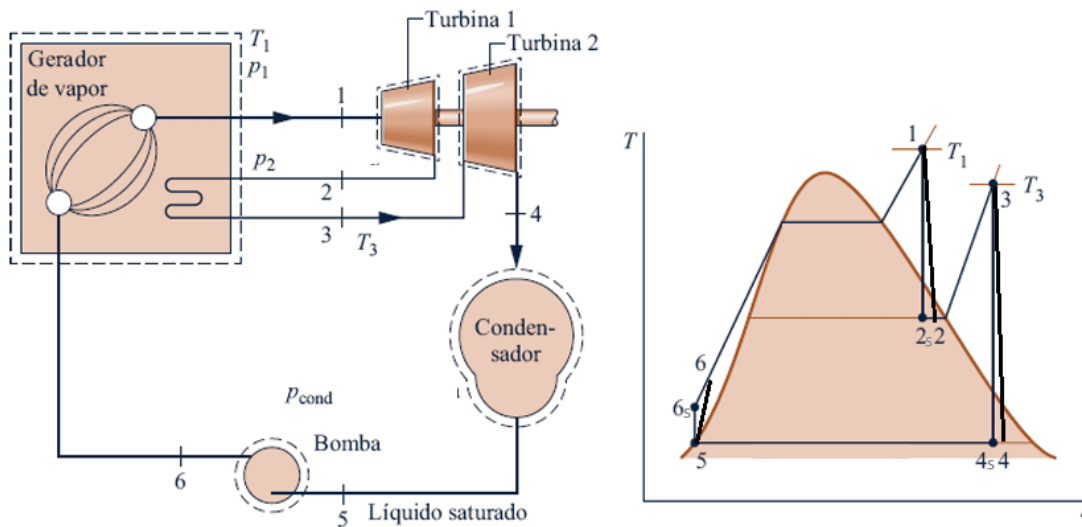
```

1.4 1) Ciclo Rankine com Reaquecimento — 4,0 pontos

1ª Questão) Considere um Ciclo Rankine com Reaquecimento, operando nas pressões 10, 700 e 6000 kPa, com todas as máquinas de fluxo (i.g., bombas, turbinas) com eficiência isentrópica de 80%. Nas duas saídas da caldeira, a temperatura é 360 °C. Calcule o título na saída da turbina de alta pressão. (4,0 pontos)

1.4.1 Hipóteses

- Regime permanente
- Caldeira e condensador isobáricos
- Bomba e turbinas adiabáticas
- Quedas de pressão e perdas de energia são desprezados nas conexões
- Caldeira fornece vapor **superaquecido** a 6 MPa e 400 °C.
- Reaquecimento eleva novamente a **400 °C** a 0,7 MPa.
- $\eta_{\text{turbinas}} = \eta_{\text{bombas}} = 0,80$ (definição de eficiência isentrópica).
- Condensador a **10 kPa**.



Objetivo. Determinar o estado após a turbina de alta, calculando h_2 , identificando a fase em p_2

e, se aplicável, o título x .

Dados. $\eta_t = 0,80$, $p_1 = 6,0$ MPa, $p_2 = 0,8$ MPa, $T_{\text{boiler_out}} = 360^\circ\text{C}$. Propriedades em SI: T [K], p [Pa], h [J/kg], s [J/(kg · K)].

1.5 Passos e equações

1) Estado 1 (entrada da turbina).

$$h_1 = h(p_1, T_{\text{boiler_out}}), \quad s_1 = s(p_1, T_{\text{boiler_out}})$$

2) Saída isentrópica (2s).

$$h_{2s} = h(p_2, s_1)$$

3) Eficiência isentrópica da turbina.

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_{2,\text{real}}}{h_1 - h_{2s}} \Rightarrow h_2 \equiv h_{2,\text{real}} = h_1 - \eta_t (h_1 - h_{2s})$$

4) Verificação de fase em p_2 .

$$h_f = h(p_2, x=0), \quad h_g = h(p_2, x=1)$$

- Se $h_f \leq h_2 \leq h_g$: mistura bifásica, com

$$x = \frac{h_2 - h_f}{h_g - h_f}$$

- Se $h_2 < h_f$: líquido comprimido.
- Se $h_2 > h_g$: vapor superaquecido.

```
[12]: # === Q1: Estado após a turbina de alta (6 MPa -> 0,8 MPa) ===
eta_t = 0.80
p_hi   = 6_000_000.0      # Pa (6 MPa)
p_reh   = 700_000.0       # Pa (0.8 MPa)
T_boiler_out = 360.0 + 273.15 # K

if HAS_COOLPROP:
    fluid = 'Water'
    # Estado 1: entrada turbina de alta
    h1 = PropsSI('H','P',p_hi,'T',T_boiler_out,fluid)
    s1 = PropsSI('S','P',p_hi,'T',T_boiler_out,fluid)
    # Expansão 1 -> 2 (turbina de alta): 6 MPa -> 0.8 MPa
    h2, aux = turbine_h_out(h1, s1, p_reh, eta_is=eta_t, fluid=fluid)

    # Verificar fase em (p=0.8 MPa, h=h2)
    Tsat_reh = PropsSI('T','P',p_reh,'Q',0,fluid)
```

```

hf = PropsSI('H','P',p_reh,'Q',0,fluid)
hg = PropsSI('H','P',p_reh,'Q',1,fluid)
if hf <= h2 <= hg:
    x = (h2 - hf)/(hg - hf)
    fase = "bifásica"
else:
    x = None
    fase = "liquido comprimido" if h2 < hf else "vapor superaquecido"

print(f"Estado 1 (6 MPa, 360 C): h1={h1/1000:.2f} kJ/kg, s1={s1/1000:.3f} kJ/(kg.K)")
print(f"Estado 2 (0.7 MPa, apos turbina de alta): h2={h2/1000:.2f} kJ/kg -> fase: {fase}")
if x is not None:
    print(f"Titulo na saida da turbina de alta: x = {x:.4f}")
else:
    print("Titulo nao aplicavel (estado nao esta na cupula de saturacao).")
else:
    print("CoolProp indisponivel. Use tabelas de vapor:")
    print("1) Obter h1, s1 em (6 MPa, 360 C).")
    print("2) Em p=0.8 MPa, encontrar h2s com s=s1 (superaquecido).")
    print("3) h2 = h1 - eta_t*(h1 - h2s).")
    print("4) Verificar fase em p=0.8 MPa e calcular x se bifasico.")

```

Estado 1 (6 MPa, 360 C): h1=3071.99 kJ/kg, s1=6.380 kJ/(kg.K)

Estado 2 (0.7 MPa, apos turbina de alta): h2=2710.11 kJ/kg -> fase: bifásica

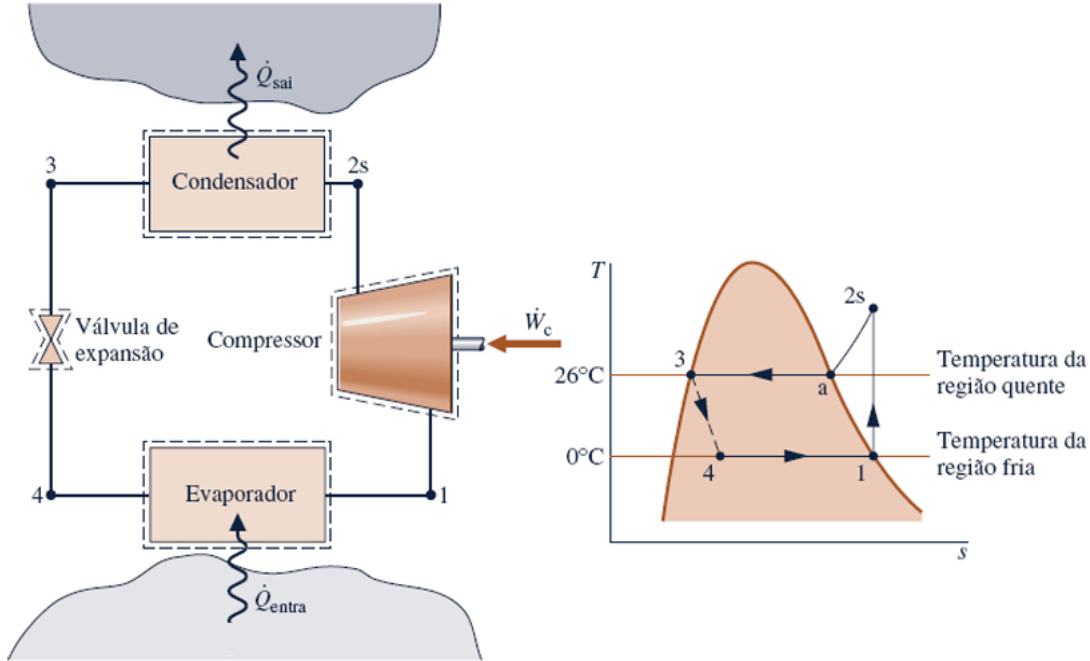
Titulo na saida da turbina de alta: x = 0.9745

1.6 2) Ciclo de Refrigeração por Compressão a Vapor (R134a) — 3,0 pontos

2ª Questão) O dispositivo de expansão de um Ciclo de Refrigeração por Compressão a Vapor (R134a) opera entre as temperaturas 40 °C e 5 °C. Qual o COP (i.e. coeficiente de performance, coeficiente de desempenho) do ciclo? (3,0 pontos)

1.6.1 Hipóteses

- Regime permanente
- Compressor adiabático e isentrópico
- **Ciclo ideal** (compressão isentrópica), **sem superaquecimento** na saída do evaporador e **sem sub-resfriamento** na saída do condensador.
- Evaporação a 4 °C (**saturado**) e condensação a 40 °C (**saturado**).
- Válvula de expansão **isentálpica**, sem variação de energia cinética e potencial.
- Desprezar perdas de pressão em trocadores/linhas.



Objetivo. Calcular o coeficiente de desempenho (COP) de um ciclo ideal de compressão de vapor com R134a operando entre $T_e = 4^\circ\text{C}$ e $T_c = 40^\circ\text{C}$.

Hipóteses. Compressor isentrópico, condensação e evaporação a pressão constante, dispositivo de expansão isentálpico. Propriedades no sistema SI.

—m

1.7 Estados e relações termodinâmicas

- 1) **Entrada do compressor (1) — vapor saturado a T_e**

$$p_1 = p_{\text{sat}}(T_e), \quad h_1 = h(T_e, x = 1), \quad s_1 = s(T_e, x = 1)$$

- 2) **Saída do compressor ideal (2) — compressão isentrópica até p_{cond}**

$$p_2 = p_{\text{cond}} = p_{\text{sat}}(T_c) \quad (\text{no código, } p_2 \equiv p_3), \quad s_{2s} = s_1, \quad h_{2s} = h(p_2, s_1)$$

Como o compressor é ideal, vale $h_2 = h_{2s}$.

- 3) **Saída do condensador (3) — líquido saturado a T_c**

$$p_3 = p_{\text{sat}}(T_c), \quad h_3 = h(T_c, x = 0)$$

- 4) **Saída da válvula (4) — expansão isentálpica**

$$h_4 = h_3$$

1.8 Balanços específicos e COP

Calor específico absorvido no evaporador:

$$q_L = h_1 - h_4$$

Trabalho específico do compressor:

$$w_C = h_2 - h_1$$

Coefficiente de desempenho do refrigerador:

$$\text{COP}_R = \frac{q_L}{w_C} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

```
[14]: # === Q2: COP de um ciclo ideal de compressao de vapor com R134a ===
Te = 4.0 + 273.15      # K
Tc = 40.0 + 273.15    # K
fluid = 'R134a'

if HAS_COOLPROP:
    # 1: vapor saturado a Te
    p1 = PropsSI('P','T',Te,'Q',1,fluid)
    h1 = PropsSI('H','T',Te,'Q',1,fluid)
    s1 = PropsSI('S','T',Te,'Q',1,fluid)
    # 3: liquido saturado a Tc
    h3 = PropsSI('H','T',Tc,'Q',0,fluid)
    p3 = PropsSI('P','T',Tc,'Q',0,fluid)
    # 4: valvula isentalpica
    h4 = h3
    # 2s: compressao isentropica ate pressao de saturacao a Tc
    h2s = PropsSI('H','S',s1,'P',p3,fluid)
    h2 = h2s # compressor ideal base

    qL = h1 - h4
    wC = h2 - h1
    COP = qL / wC

    print(f"p_evap = {p1/1000:.1f} kPa, p_cond = {p3/1000:.1f} kPa")
    print(f"h1={h1/1000:.2f} kJ/kg, h2={h2/1000:.2f} kJ/kg, h3={h3/1000:.2f} kJ/kg, h4={h4/1000:.2f} kJ/kg")
    print(f"qL={qL/1000:.2f} kJ/kg, wC={wC/1000:.2f} kJ/kg, COP={COP:.2f}")
else:
    print("CoolProp indisponivel. Passos com tabelas do R134a:")
    print("1) h1,s1 em Te=4 C (vapor sat.) 2) h2s por s=s1 a p_cond (40 C)")
    print("3) h3 em Tc=40 C (liquido sat.) 4) h4=h3 -> COP=(h1-h4)/(h2-h1)")y
```

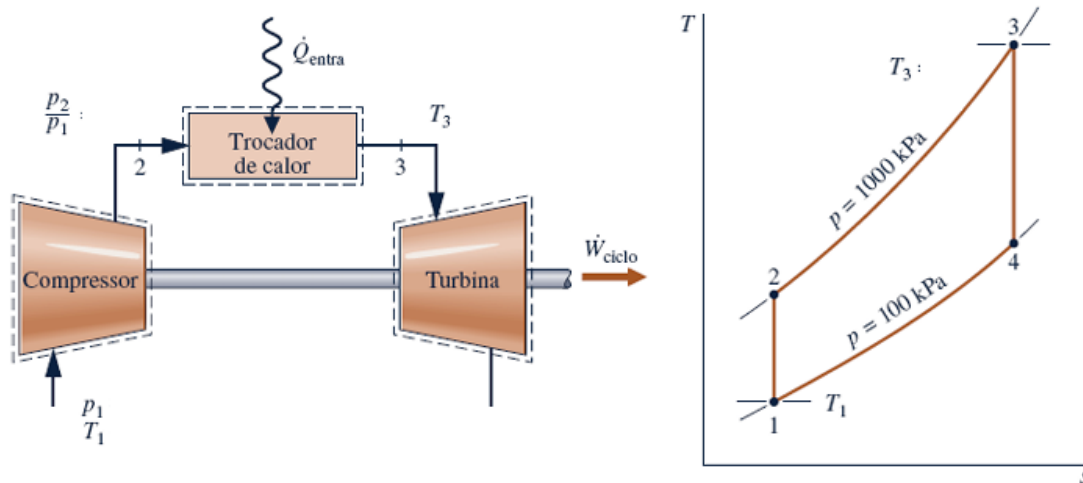
$p_{\text{evap}} = 337.7 \text{ kPa}$, $p_{\text{cond}} = 1016.6 \text{ kPa}$
 $h_1 = 400.92 \text{ kJ/kg}$, $h_2 = 423.81 \text{ kJ/kg}$, $h_3 = 256.41 \text{ kJ/kg}$, $h_4 = 256.41 \text{ kJ/kg}$
 $q_L = 144.51 \text{ kJ/kg}$, $w_C = 22.89 \text{ kJ/kg}$, $\text{COP} = 6.31$

1.9 3) Ciclo Brayton (motor de avião) — 3,0 pontos

3ª Questão) O motor de um avião (Ciclo Brayton), aspira ar a 25°C e 100 kPa e tem uma relação de pressão de 10:1. Qual a temperatura na entrada da câmara de combustão? (3,0 pontos)

1.9.1 Hipóteses

- **Ar-padrão** com propriedades constantes ($\gamma = 1,4$; $c_p = 1,004 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$).
- Regime permanente
- **Compressão isentrópica** (caso base). Alternativa: adote η_c específico e calcule T real.
- Desprezar perdas no duto entre compressor e câmara.



Objetivo. Determinar as temperaturas de saída do compressor em um modelo ar-padrão: - caso isentrópico: T_{2s} , - caso com eficiência do compressor: T_2 para um dado η_c .

Definições e dados. Temperatura e pressão na entrada: T_1 , p_1 ; razão de pressões $r_p = p_2/p_1$; expoente adiabático γ (ar seco: $\gamma \approx 1,4$). As temperaturas estão em K e as pressões são absolutas.

1.10 Relações termodinâmicas

1) **Saída isentrópica do compressor (gás ideal):**

$$T_{2s} = T_1 r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}.$$

2) **Eficiência isentrópica do compressor:**

$$\eta_c = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \Rightarrow T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_c}.$$

Observações. Para $\eta_c = 1$, tem-se $T_2 = T_{2s}$. Para $0 < \eta_c < 1$, vale $T_2 > T_{2s}$.

```
[15]: # === Q3: Temperatura na entrada da camara (saida do compressor) ===
T1 = 25.0 + 273.15    # K
p1 = 100_000.0        # Pa
r_p = 10.0            # p2/p1
gamma = 1.4

# Caso base: compressor isentropico
T2s = T1 * (r_p ** ((gamma - 1.0)/gamma))

# Se quiser considerar eta_c != 1:
eta_c = 1.0    # edite para, por exemplo, 0.85
T2 = T1 + (T2s - T1)/eta_c

print(f"T1 = {T1:.2f} K (25 C)")
print(f"r_p = {r_p:.2f}, gamma = {gamma:.2f}")
print(f"T2s (isentropico) = {T2s:.2f} K")
print(f"Assumindo eta_c = {eta_c:.2f} => T2 = {T2:.2f} K (entrada da camara_
↳ de combustao)")
```

T1 = 298.15 K (25 C)

r_p = 10.00, gamma = 1.40

T2s (isentropico) = 575.64 K

Assumindo eta_c = 1.00 => T2 = 575.64 K (entrada da camara de combustao)