

Propriedades Termodinâmicas

- ▶ **Tabelas de propriedade --
medidas**
- ▶ **Equação de Estado --
equações relacionando $P, v,$
e T de uma substância**

Equação de Estado de um gás ideal

- ▶ Qualquer relação entre pressão, temperatura e volume específico de uma substância é uma *equação de estado*. A mais simples e mais conhecida é a *equação de estado de um gás ideal*:

$$P v = R T$$

onde R é a constante do gás. Cuidado: gás ideal é uma substância idealizada! **Os gases reais se comportam como gás ideal a baixas pressões e altas temperaturas.**

Constante universal dos gases

$$\begin{aligned}R_u &= 8.31434 \text{ kJ/kmol-K} \\ &= 8.31434 \text{ kPa-m}^3/\text{kmol-K} \\ &= 0.0831434 \text{ bar-m}^3/\text{kmol-K} \\ &= 82.05 \text{ L-atm/kmol-K} \\ &= 1.9858 \text{ Btu/lbmol-R} \\ &= 1545.35 \text{ ft-lbf/lbmol-R} \\ &= 10.73 \text{ psia-ft}^3/\text{lbmol-R}\end{aligned}$$

Exemplo

Determinar a constante para o ar e para o hidrogênio

$$R_{air} = \frac{R_u}{M} = \frac{8.1417 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}}{28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 0.287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$R_{hydrogen} = \frac{8.1417 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}}{2.016 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 4.124 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

A “lei” dos gases perfeitos é uma simples equação de estado

$$PV = mRT$$

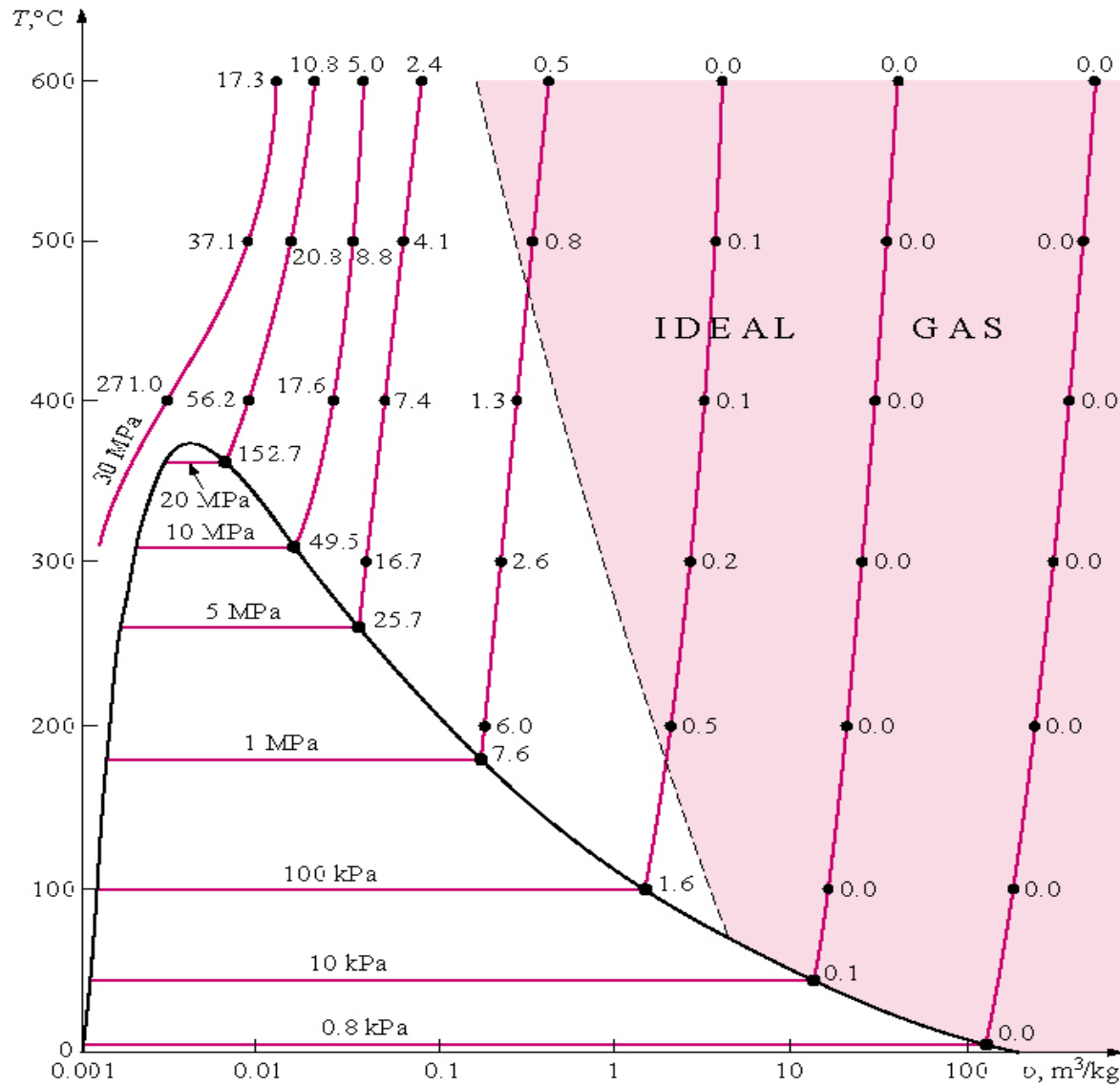
$$Pv = RT$$

$$PV = NR_u T$$

$$P \bar{v} = R_u T ; \bar{v} = V / N$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Porcentagem de erro ao se aplicar a lei dos gases perfeitos



Questão

**Em que circunstâncias
pode-se aplicar a equação
dos gases perfeitos?**

Lei dos gases perfeitos

- ▶ Boa aproximação para o comportamento de P-v-T de gases reais a baixas densidades (**baixas pressões e altas temperaturas**).
- ▶ Ar, nitrogênio, oxigênio, hidrogênio, hélio, argônio, neon, dióxido de carbono, ($< 1\%$ erro).

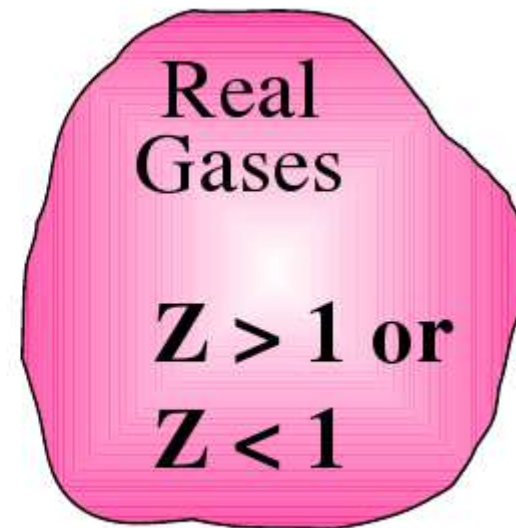
Fator de compressibilidade

- ▶ O desvio de comportamento em relação a um gás perfeito é considerado através do *fator de compressibilidade Z*:

$$Z = \frac{P v}{RT} \quad \text{or} \quad Z = \frac{v_{actual}}{v_{ideal}}$$

Z representa a razão de volumes ou compressibilidade.

Fator de compressibilidade



Gases Reais

$$Pv = ZRT$$

- ▶ **Z é conhecido como fator de compressibilidade.**
- ▶ **Gases reais, $Z < 1$ or $Z > 1$.**

Fator de Compressibilidade

- ▶ **Leva em consideração 2 fatores básicos**
 - Estrutura molecular
 - Forças intermoleculares

Princípio dos estados correspondentes

- ▶ O fator de compressibilidade Z é aproximadamente o mesmo para todos os gases às mesmas **temperatura reduzida** e **pressão reduzida**.

$$Z = Z(P_R, T_R) \text{ para todos os gases}$$

Pressão e temperatura reduzidas

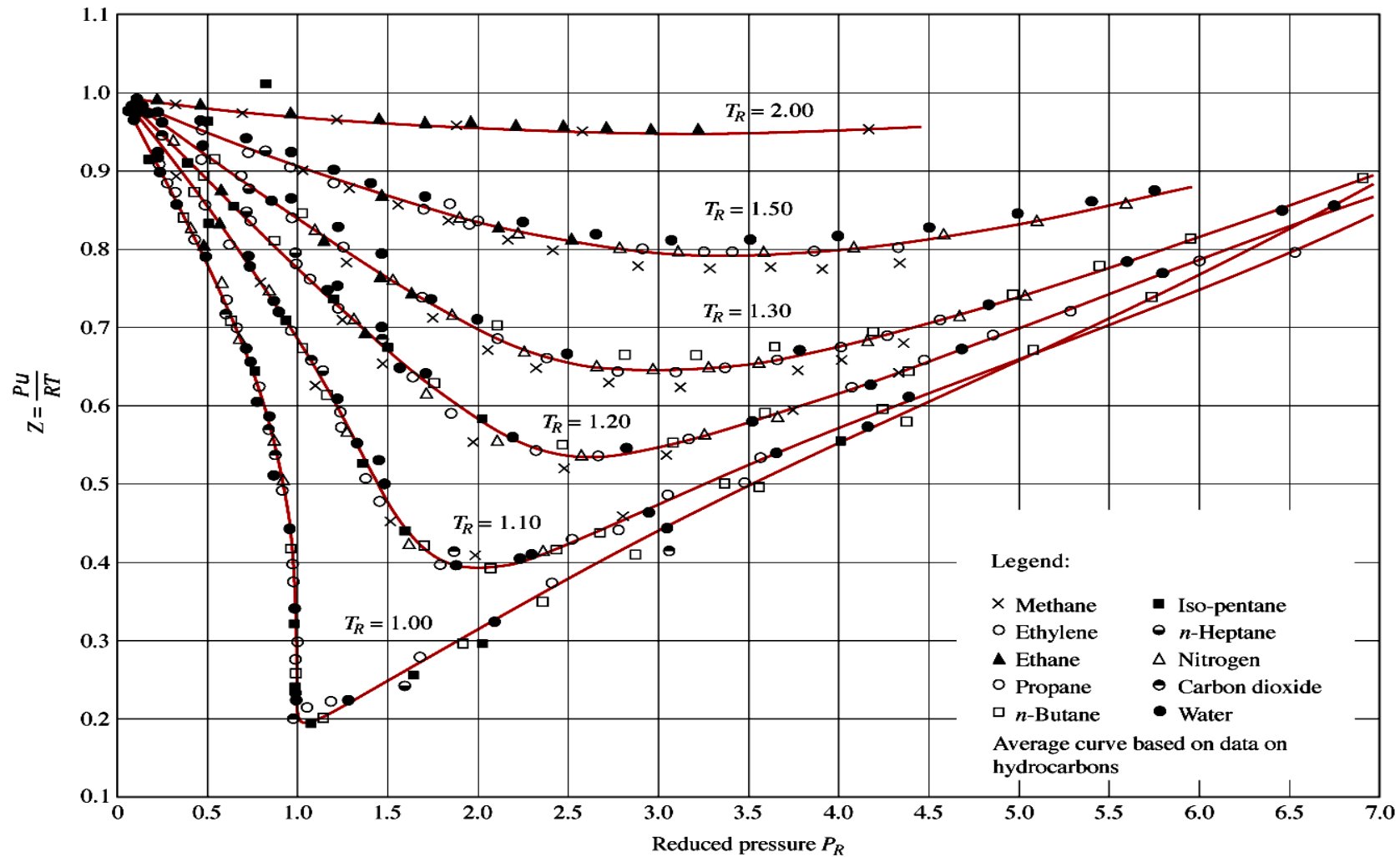
$$P_R \equiv \frac{P}{P_{cr}} ; T_R \equiv \frac{T}{T_{cr}}$$

onde:

P_R e T_R são valores reduzidos.

P_{cr} e T_{cr} são propriedades críticas.

Fator de compressibilidade para 10 substâncias (aplicável para todos os gases Tabela A-3)



Onde podemos encontrar as propriedades do ponto crítico? Tabela A-7

	Mol (kg-Mol)	R (J/kg.K)	Tcrit (K)	Pcrit (MPa)
Ar	28,97	287,0	(---)	(---)
O₂	32,00	259,8	154,8	5,08
H₂	2,016	4124,2	33,3	1,30
H₂O	18,016	461,5	647,1	22,09
CO₂	44,01	188,9	304,2	7,39

Aproximação de gás ideal

- ▶ A carta de compressibilidade mostra condições nas quais $Z = 1$ e o gás se comporta como um gás ideal:
- ▶ (a) $P_R < 0.1$ e $T_R > 1$

Exercício 3-21

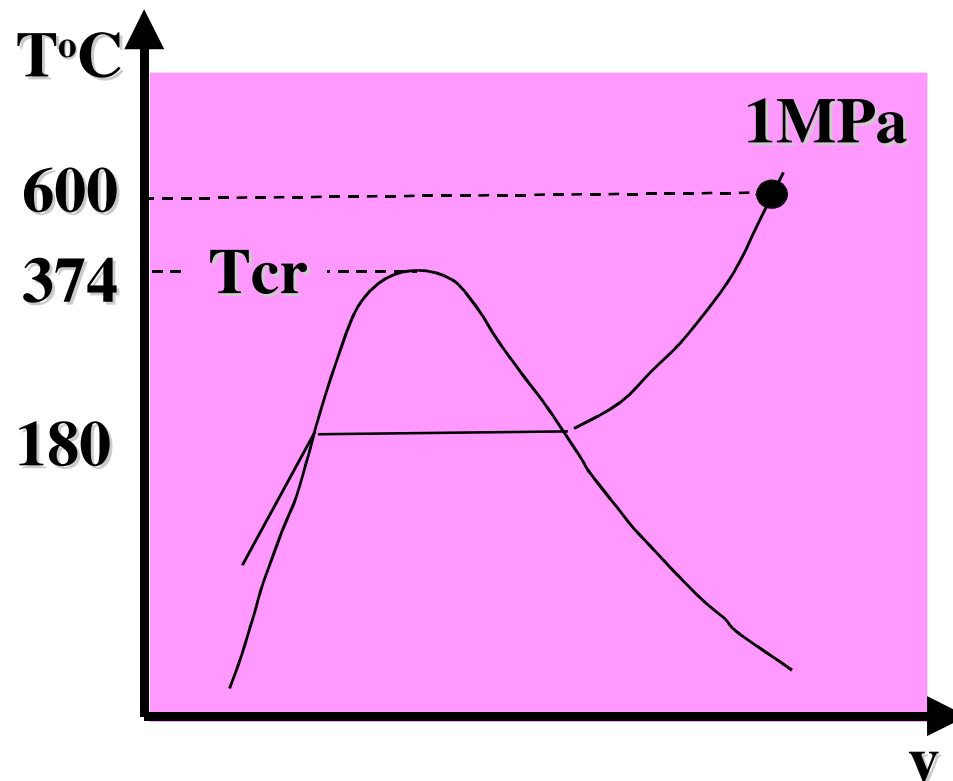
Vapor a 600 °C e 1 MPa. Avaliar o volume específico utilizando a tabela de vapor e a lei dos gases perfeitos ($R_{\text{vapor}} = 0,461 \text{ kJ/kgK}$)

Exercício 3-21

Vapor a 600 °C e 1 MPa. Avaliar o volume específico utilizando a tabela de vapor e a lei dos gases perfeitos

$T_{\text{sat}} = 180^\circ\text{C}$ logo é vapor superaquecido (Tabela A-3)

Volume = 0,4011 m^3/kg



Exercício 3-21 (cont.)

Parte (b): lei dos gases perfeitos

$$R_{\text{vapor}} = 461 \text{ J/kgK}$$

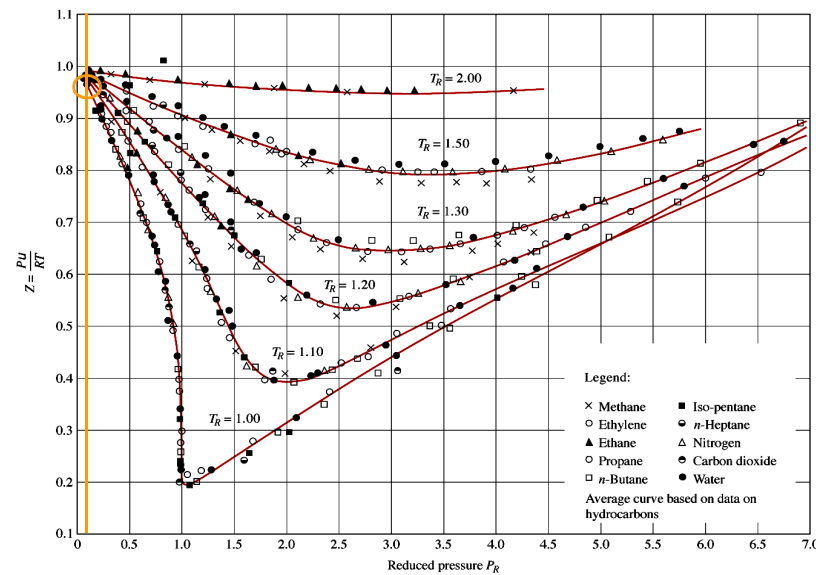
$$v = RT/P, \quad v = 461 \times 873 / 10^6 = 0.4024 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Vapor é um gás perfeito nesse estado: o erro é de 0.3%

Verifique!

$$P_R = 1/22.09 = 0.05$$

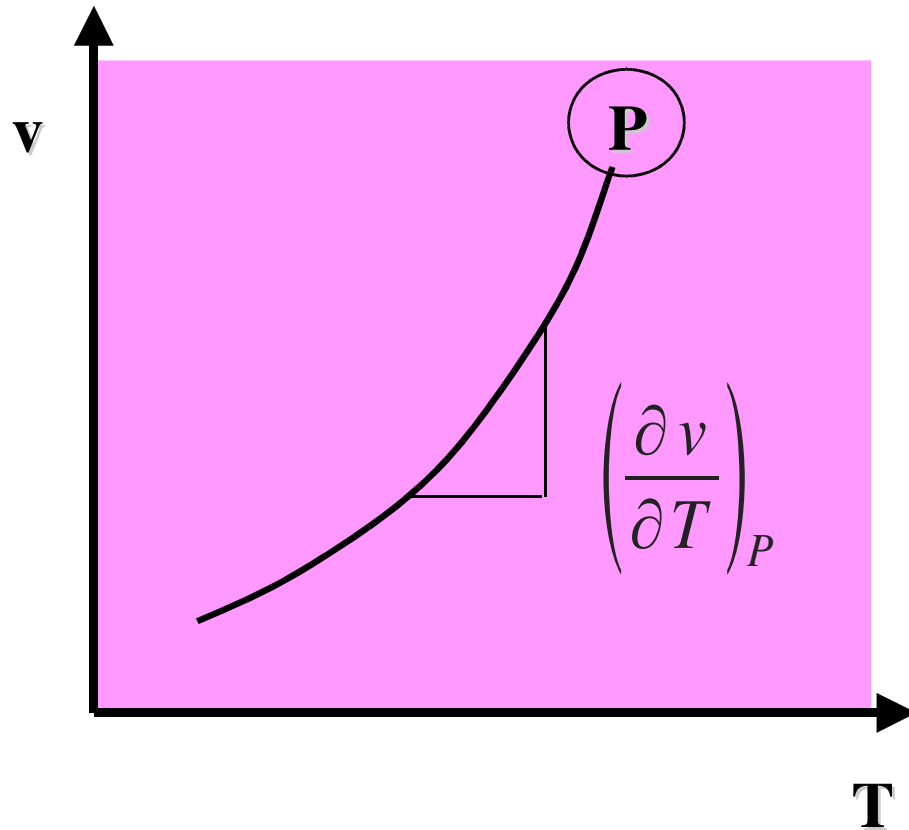
$$\& T_R = 873/647 = 1.35$$



Questão

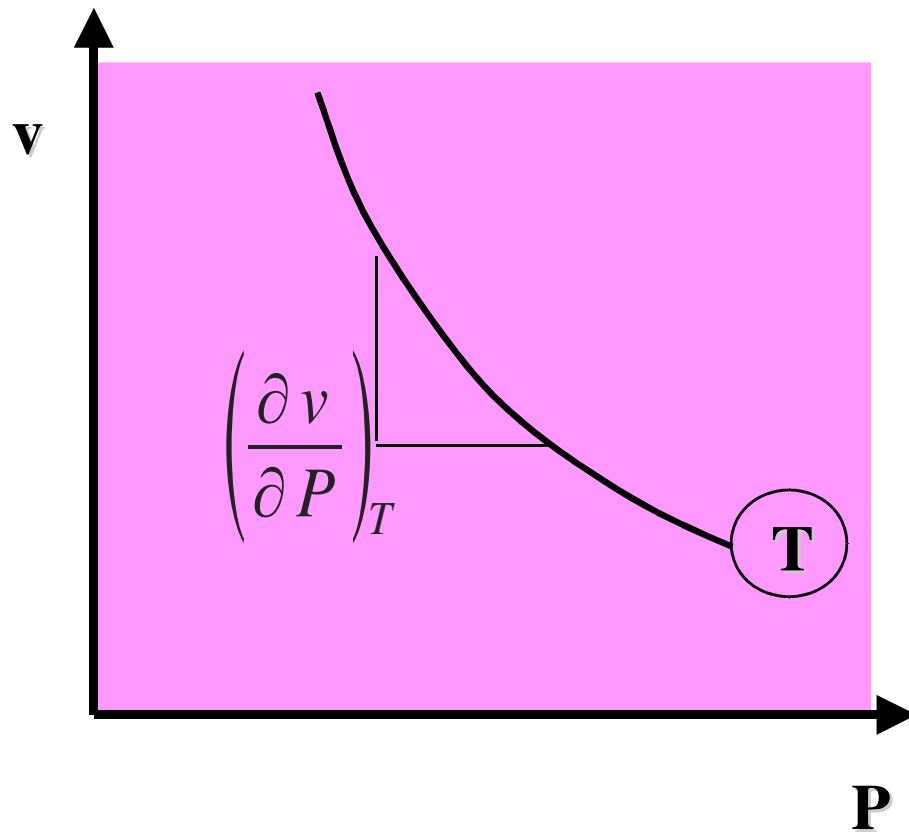
Encontre o fator de compressibilidade para determinar o erro ao se tratar oxigênio a 160 K e 3 MPa como um gás perfeito.

Outras propriedades termodinâmicas:
Coeficiente de expansão volumétrica
(compressibilidade isobárica)



$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P > 0$$

Outras propriedades termodinâmicas: *Compressibilidade isotérmica*



$$\kappa = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T > 0$$

Outras propriedades termodinâmicas:

O volume pode ser visto como uma função da pressão e da temperatura, $v = v(P, T)$.

Logo :

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T dP \equiv \beta v dT - \kappa v dP$$

Se κ e β forem constantes, podemos integrar em v :

$$\ln \left(\frac{v}{v_0} \right) = \beta (T - T_0) - \kappa (P - P_0)$$

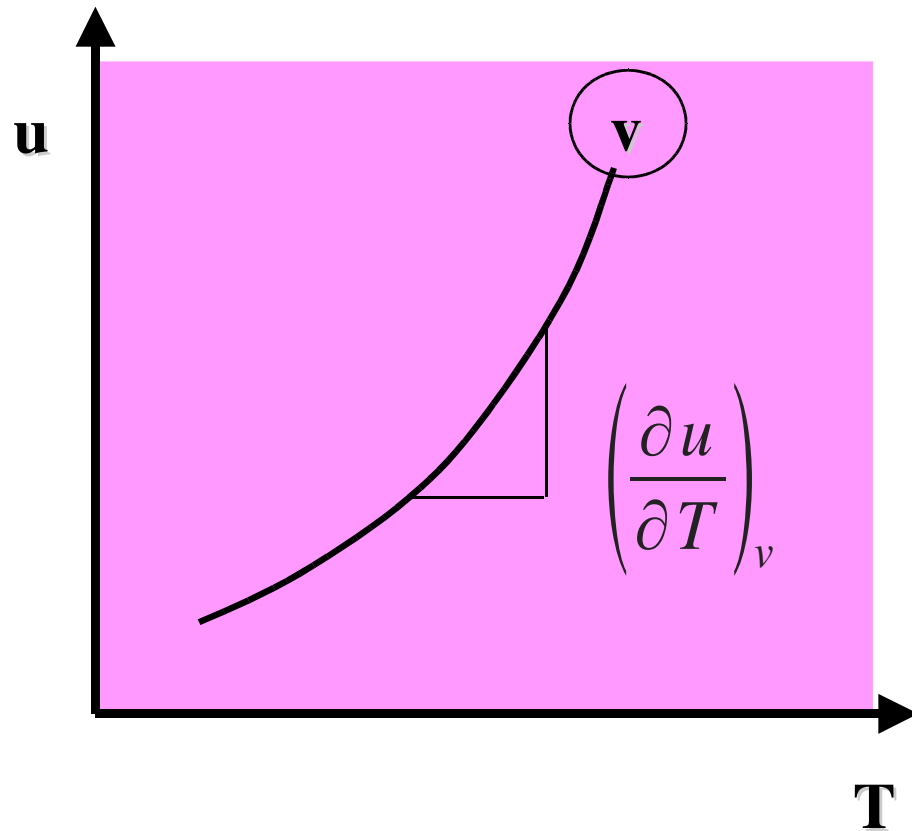
*Outras propriedades termodinâmicas:
Energia interna, Entalpia e Entropia*

$$u = u(T, v)$$

$$h = h(T, P) \equiv u + Pv$$

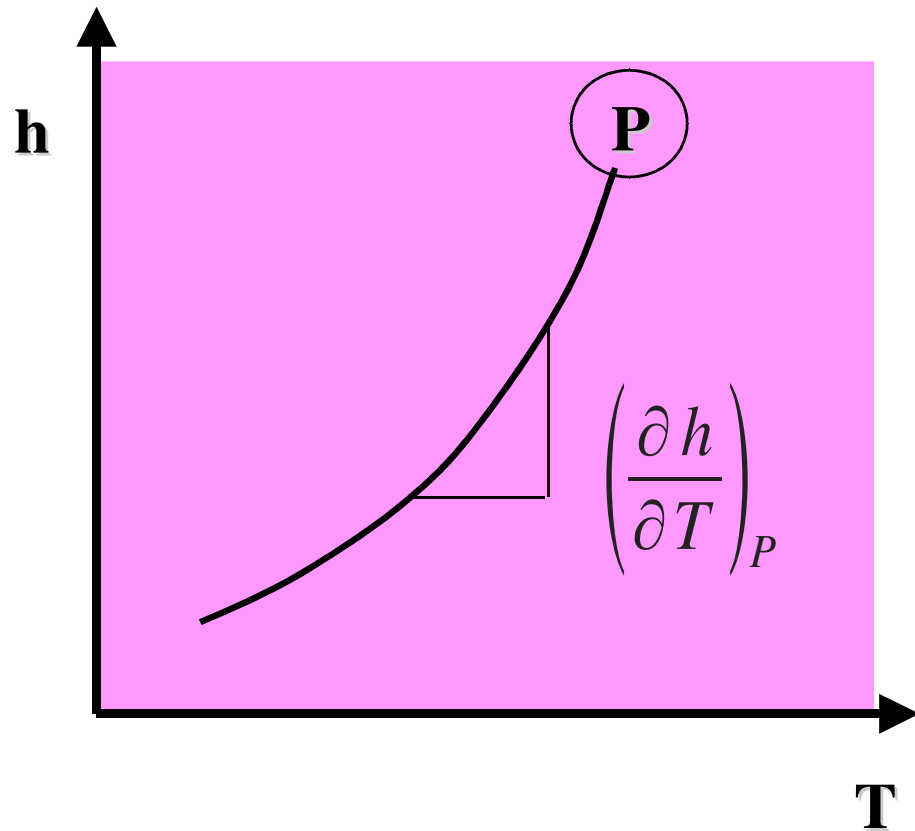
$$s = s(u, v)$$

Outras propriedades termodinâmicas:
Calor Específico a volume constante



$$C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v > 0$$

Outras propriedades termodinâmicas:
Calor Específico a pressão constante

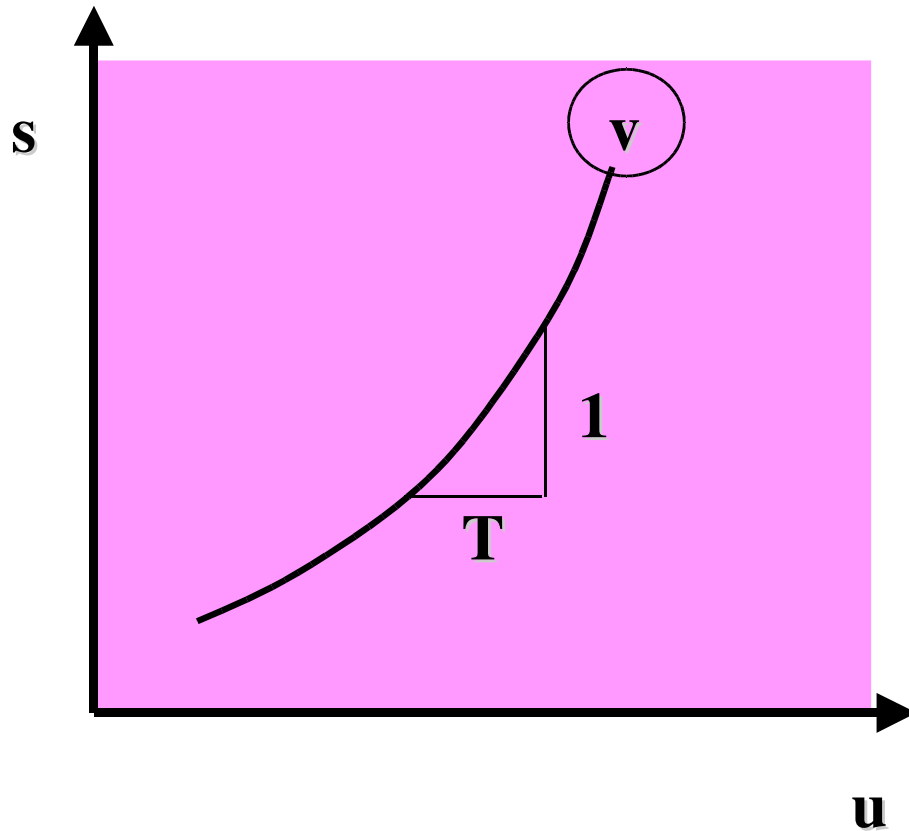


$$C_P = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P > 0$$

Outras propriedades termodinâmicas:
Razão de calores específicos

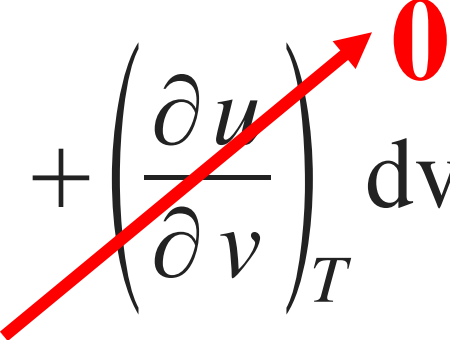
$$\gamma = \left(\frac{C_p}{C_v} \right)$$

Outras propriedades Termodinâmicas: *Temperatura*



$$T = \left(\frac{\partial s}{\partial u} \right)_v^{-1} > 0$$

Gases perfeitos: $u = u(T)$

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv$$


Logo,

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT = C_v(T) dT$$

*Podemos integrar du e obter a
variação de u:*

$$du = C_v dT$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_v(T) dT$$

Note que C_v varia com a temperatura e não pode ser automaticamente “tirado” da integral

Entalpia de um gás perfeito:

- ▶ $h = u + Pv$ onde Pv pode ser substituído por RT ($Pv = RT$).
- ▶ Logo, $h = u + RT \Rightarrow$ como u é função apenas de T e R é uma constante, h é função apenas de T
- ▶ $h = h(T)$

**Assim, para uma mudança na entalpia
de um gás perfeito:**

$$C_p = C_p(T) \quad \text{e} \quad \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right) \equiv 0$$

$$dh = C_p dT, \quad \text{e}$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT$$

Gás perfeito: resumo

- ▶ Para gases perfeitos u , h , C_v , e C_p são funções apenas da temperatura.
- ▶ Para gases perfeitos, C_v e C_p são escritos em termos de diferenciais ordinárias

$$C_v = \left(\frac{du}{dT} \right)_{ideal \text{ gas}} ; \quad C_p = \left(\frac{dh}{dT} \right)_{ideal \text{ gas}}$$

Para um gás perfeito

► $h = u + Pv = u + RT$

$$\frac{dh}{dT} = \frac{du}{dT} + R$$

$$C_p = C_v + R \quad \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$$

Razão de calores específicos, γ

$$\gamma \equiv \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_p(T)}{C_v(T)} = \gamma(T)$$

$$\frac{C_p}{C_v} = 1 + \frac{R}{C_v} = \gamma > 1$$

Outras relações que podem ser facilmente desenvolvidas

$$C_v = \frac{R}{\gamma - 1} \quad e \quad C_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$$

Para gases monoatômicos

$$C_p = \frac{5}{2} R, \quad C_v = \frac{3}{2} R$$

e ambas são constantes.

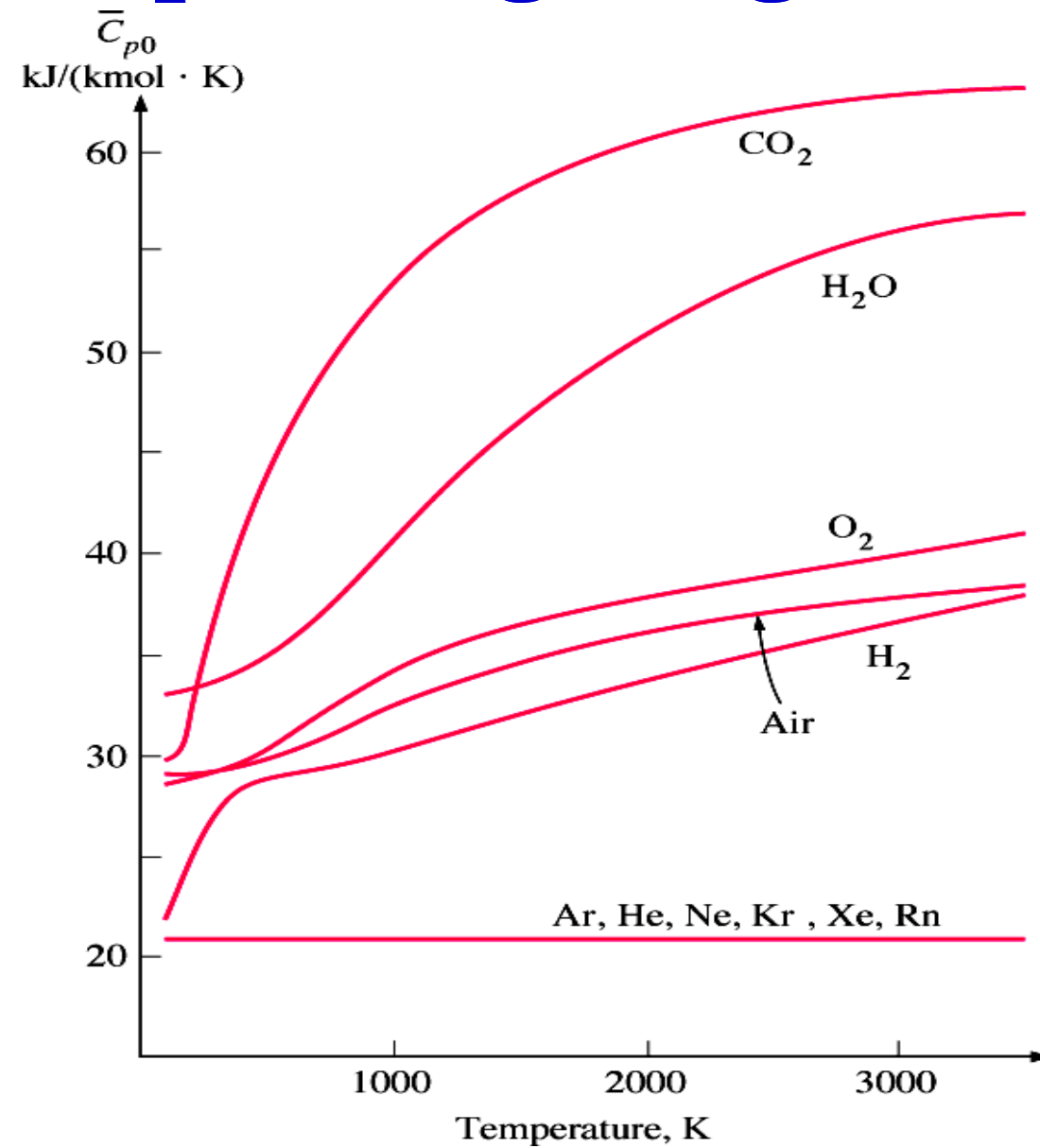
Argônio, Hélio, Neon

Para todos os outros gases

- ▶ C_p é função da temperatura (pode ser calculado a partir de equações como as da tabela A-5)
- ▶ C_v pode ser calculado a partir de $C_p = C_v + R$.
- ▶ A próxima figura mostra o comportamento com a temperatura calores específicos aumentam com a temperatura.

Calores Esp. de alguns gases

► $C_p = C_p(T)$



Três formas de calcular Δu e Δh

- ▶ $\Delta u = u_2 - u_1$ (table)

- ▶ $\Delta u = \int_1^2 C_v(T) dT$

- ▶ $\Delta u = C_{v,av} \Delta T$

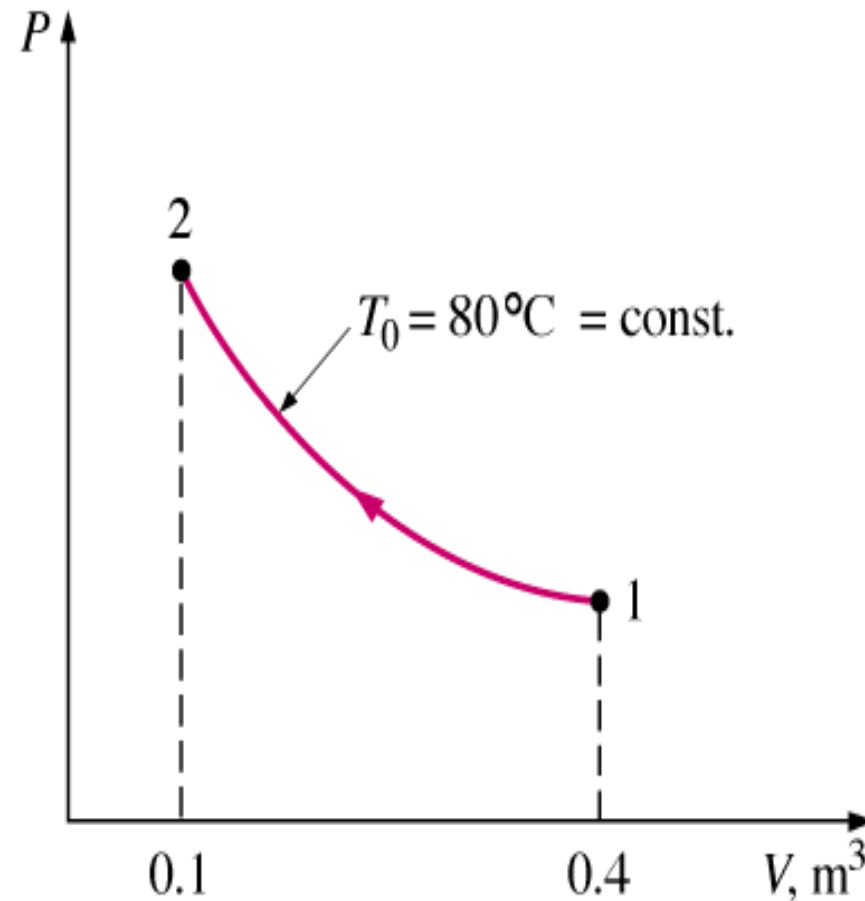
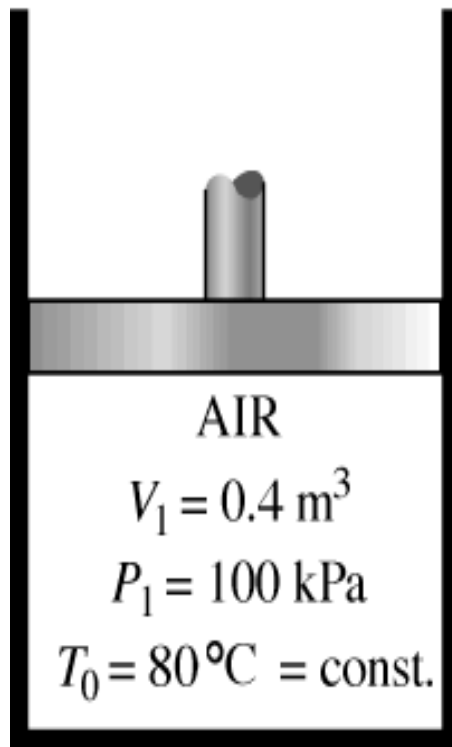
- ▶ $\Delta h = h_2 - h_1$ (table)

- ▶ $\Delta h = \int_1^2 C_p(T) dT$

- ▶ $\Delta h = C_{p,av} \Delta T$

Processos isotérmicos

- Gás perfeito: $PV = mRT$



Gás perfeito: $PV = mRT$

$$W_b = \int_1^2 P dV = \int_1^2 \frac{mRT}{V} dV$$

$$W_b = mRT \int_1^2 \frac{dV}{V} = mRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Processo adiabático de um gás perfeito e trabalho reversível

- ▶ **Qual é o caminho para processos que expandem ou comprimem sem fluxo de calor? Como P, v e T se comportam quando $Q = 0$?**
- ▶ **Para desenvolver uma expressão:**
 - **Modo de trabalho reversível: $\delta W = PdV$**
 - **Hipótese adiabático: Q e $dQ = 0$**
 - **Lei dos gases perfeitos: $Pv = RT$**
 - **Relações de calores específicos**
 - **Primeira lei da termodinâmica: $\delta Q - \delta W = dU$**

Processo adiabático de um gás perfeito e trabalho reversível (cont.)

Primeira lei:

$$\underbrace{dQ}_{=0} - \underbrace{dW}_{PdV} = \underbrace{dU}_{MC_v dT}$$

P = MRT/V

$$\left(\frac{dV}{V}\right) = \underbrace{-\frac{C_v}{R}}_{(1-\gamma)^{-1}} \left(\frac{dT}{T}\right)$$

**Integrando de
(1) a (2)**

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{(1-\gamma)}$$

Processo adiabático de um gás perfeito e trabalho reversível (cont.)

Lei gases perf. :

$Pv=RT$, obtém-se

outras relações

entre T, V e P:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{(\gamma - 1)}$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma$$

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma - 1)/\gamma}$$

Processo adiabático de um gás perfeito e trabalho reversível (cont.)

Com $PV^\gamma = \text{constante}$:

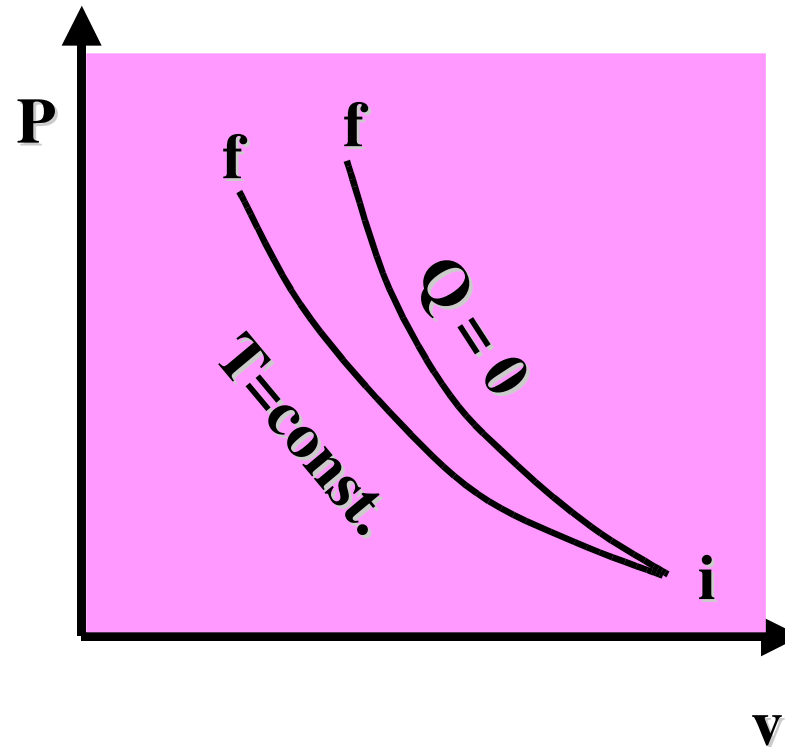
$$W = \int P dV = (PV^\gamma)_i \int \frac{dV}{V^\gamma}$$
$$W = \frac{(PV^\gamma)_i}{(1-\gamma)} \left(V_f^{(1-\gamma)} - V_i^{(1-\gamma)} \right)$$
$$\equiv \frac{[(PV)_f - (PV)_i]}{(1-\gamma)}$$

i = estado inicial

f = estado final

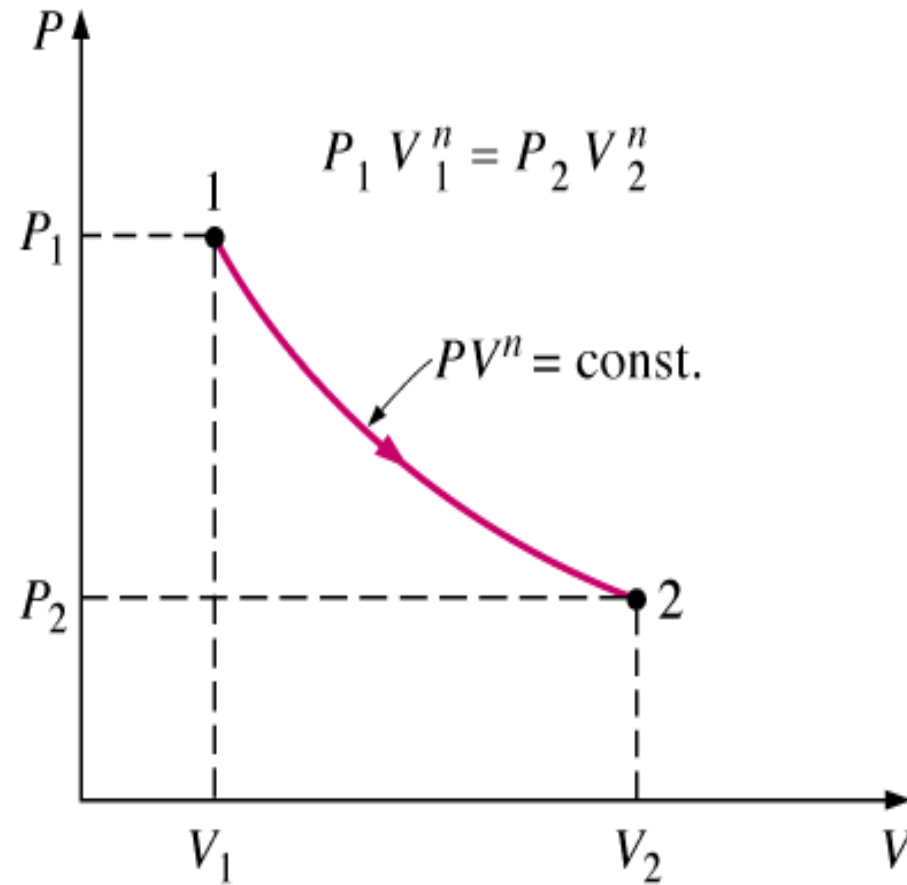
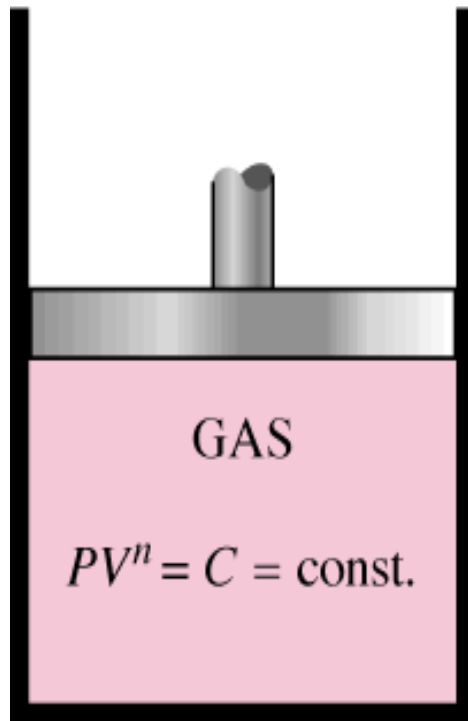
Processo adiabático de um gás perfeito e trabalho reversível (cont.)

- ▶ Na fig: caminhos $Pv^\gamma = \text{constant}$.
- ▶ Para grande parte dos gases, $\gamma \sim 1.4$
- ▶ As linhas adiabáticas estão sempre a direita das isotérmicas.
- ▶ Isotérmica: $Pv = \text{constante}$ (o expoente é a unidade)



Processo politrópico

► $PV^n = C$



Processo politrópico

Encontrado com frequência:

$$**PV^n = c = constant**$$

Como esta expressão relaciona P e V, podemos calcular o trabalho para este caminho.

$$W_b = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

Processo politrópico

Processo

Exponente n

- ▶ Pressão constante 0
- ▶ Volume constante ∞
- ▶ Isotérmico e gás perfeito 1
- ▶ Adiabático e gás perf. C_p/C_v

Trabalho de fronteira para um gás que obedece uma equação politrópica

$$W_b = \int_1^2 P dV = c \int_1^2 \frac{dV}{V^n}$$
$$c \left[\frac{V^{1-n}}{1-n} \right]_{v_1}^{v_2} = c \frac{V_2^{1-n} - V_1^{1-n}}{1-n} \quad (n \neq 1)$$

Podemos simplificar ainda mais

$$c = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

$$W_b = \frac{P_2 V_2^n (V_2^{1-n}) - P_1 V_1^n (V_1^{1-n})}{1-n} =$$
$$= \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n}, \quad n \neq 1$$

Processo politrópico

$$W_b = \int_1^2 P dV = \int_1^2 \frac{c}{V^n} dV$$

$$= \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n}, \quad n \neq 1$$

$$= PV \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right), \quad n = 1$$

Exercício 3-11

Um balde contendo 2 litros de água a 100°C é aquecido por uma resistência elétrica.

- Identifique as interações de energia se a fronteira do sistema for i) a água, ii) a resistência elétrica**
- Se calor for fornecido a 1 KW, quanto tempo será necessário para transformar toda a água em vapor? (o calor latente do vap a 1 atm é 2258 kJ/kg)**
- Se a água estiver a 25°C, qual é o tempo necessário para se vaporizar toda a água? ($C_p = 4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$)**

Solução – pag. 1

a)

Se a água for o sistema, $Q > 0$ e $W = 0$. Há uma diferença de temperatura entre a resistência e a água.

Se a resistência for o sistema, $Q < 0$ e $W < 0$. Ela converte 100% do trabalho em calor!

Solução – pag. 2

b)

A massa da água é **1,92 kg** (2 litros vezes o volume específico de 0.001044 m³/kg)

Para vaporizar toda a água, é necessário fornecer toda a energia de vaporização:

$$Evap = 2258 * 2 = 4326 \text{ KJ}$$

Potência = taxa de energia. O tempo necessário para fornecer 4326 KJ a 1KJ/sec é:

$$t = 4326/1 = 4326 \text{ s ou } 1.20 \text{ h}$$

Solução – pag. 3

c)

Calor para vaporizar toda a água inicialmente a 25°C: soma de: (1) calor sensível para aumentar temp. de 25°C a 100°C, (2) calor latente de vap. (= parte b)

O calor sensível para se aumentar de 25°C a 100°C é dado pelo calor específico ($C_p = 4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$)

$$Q = 1,92 * 4.18 * (100 - 25) = 602 \text{ KJ}$$

O tempo necessário para suprir (4570+627)KJ a 1KJ/sec é:

$$t = 4928 \text{ s ou } 1.37 \text{ h}$$

Exercício 3-12

Um balde contendo 2 litros de R-12 é deixado a pressão atmosférica (0.1 Mpa).

(a) Qual é a temperatura do R-12 assimindo que ele está no estado saturado?

(b) O ambiente transfere calor a 1KW para o líquido. Qual o tempo para que todo o R-12 vaporize? (a pressão ambiente o calor latente de vaporização do R-12 é 165 kJ/kg

Solução – pag. 1

a)

Da tabela A-2, a uma pressão de 0.1 MPa:

- **$T_{\text{sat}} = -30^{\circ}\text{C}$**
- **$V_{\text{liq}} = 0.000672 \text{ m}^3/\text{kg}$**

Solução – pag. 2

b)

$$\begin{aligned} \text{Massa de R-12: } m &= \text{Volume}/v_L = \\ &= 0.002/0.000672 = 2.98 \text{ kg} \end{aligned}$$

Energia de vaporização:

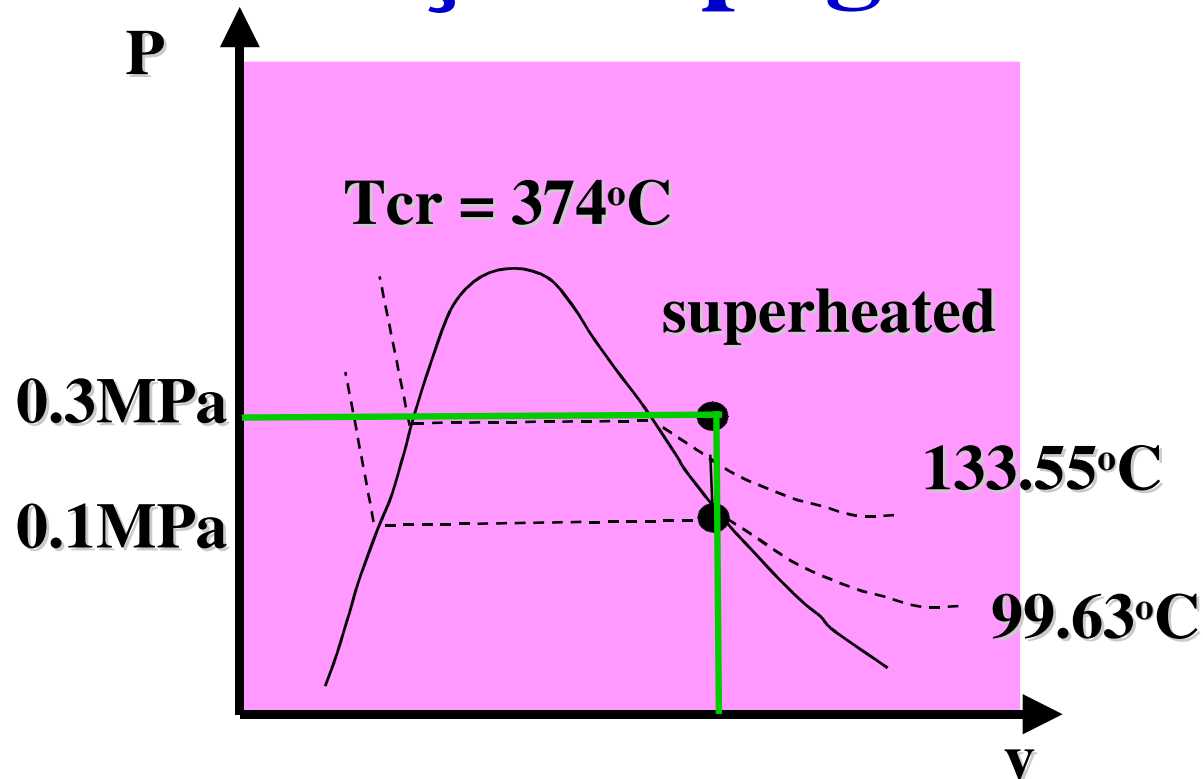
$$\begin{aligned} \text{Evap} &= \text{calor de vap} * \text{massa} = 165 * 2.98 = \\ &= 492 \text{ KJ} \end{aligned}$$

$$t = \text{calor}/\text{potência} = 492 \text{ s ou } 8.2 \text{ min}$$

Exercício 3-17

Um tanque rígido contém vapor saturado ($x = 1$) a 0.1 MPa. Calor é adicionado ao vapor aumentando a pressão para 0.3 MPa. Qual é a temperatura final do vapor?

Solução – pag. 1



Processo a volume constante: procurar na tabela de vapor superaquecido a temperatura para 0.3 MPa e $v = 1.690\text{ m}^3/\text{kg}$ -> *approx. 820°C .*

Exercício 3-30

Ar é comprimido reversivelmente e adiabaticamente de uma pressão de 0.1 Mpa e uma temperatura de 20°C para uma pressão de 1.0 Mpa.

- a) Qual a temperatura do ar após a compressão?**
- b) Qual é a razão de densidade (final/inicial)?**
- c) Quanto trabalho é realizado na compressão de 2 kg de ar?**
- d) Quanta potência é requerida para comprimir a 2 kg/s?**

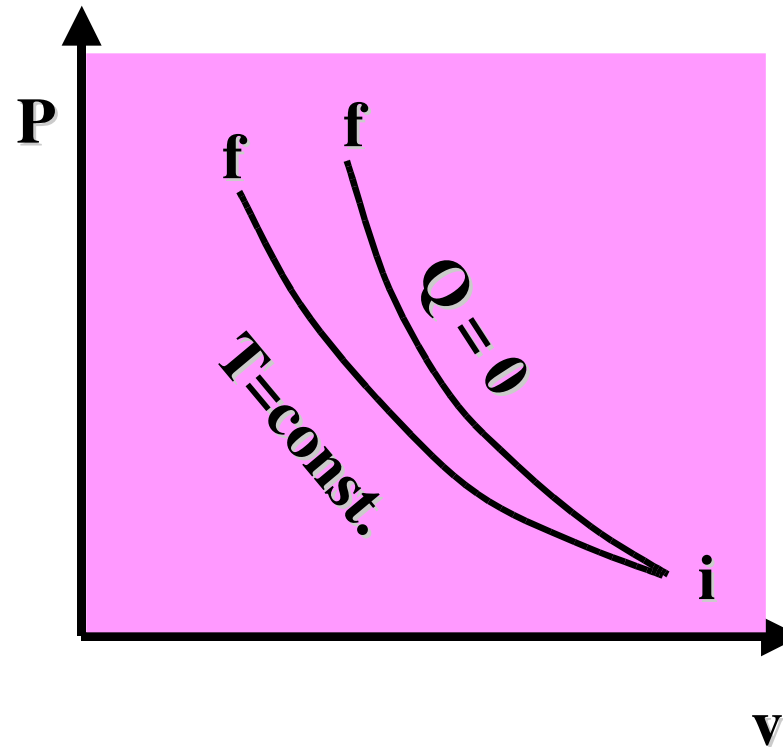
Solução – pag. 1

- Processo reversível e adiabático:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{(\gamma - 1)}$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma$$

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma - 1)/\gamma}$$



Solução – pag. 2

a)

Temperatura após a compressão

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma - 1)/\gamma} \rightarrow T_2 = 293 \cdot \left(\frac{1}{0.1} \right)^{0.4/1.4} = 566 \text{ K} \quad (293^\circ \text{C})$$

b)

Razão de densidades

$$\left(\frac{V_2}{V_1} \right) \equiv \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right) = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{-1/\gamma} \rightarrow \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) = \left(\frac{1}{0.1} \right)^{1/1.4} = 5.179$$

Solução – pag. 3

c)

Trabalho reversível:

$$\begin{aligned} W_{REV} &= \frac{[(PV)_2 - (PV)_1]}{(1 - \gamma)} \equiv \frac{M \cdot R (T_2 - T_1)}{(1 - \gamma)} = \\ &= \frac{2 \cdot 287 \cdot (566 - 293)}{0.4} = -391 \text{ KJ} \end{aligned}$$

d)

Potência:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{\dot{M} R (T_2 - T_1)}{(1 - \gamma)} = -391 \text{ KW}$$

Ex. 3.1) Utilizando a Tabela A-1.1 ou A-1.2, determine se os estados da água são de líquido comprimido, líquido-vapor, vapor superaquecido ou se estão nas linhas de líquido saturado ou vapor saturado.

- ▶ **a) $P=1,0$ MPa; $T=207$ °C**
- ▶ **b) $P=1,0$ MPa; $T=107,5$ °C**
- ▶ **c) $P=1,0$ MPa; $T=179,91$ °C; $x=0,0$**
- ▶ **d) $P=1,0$ MPa; $T=179,91$ °C; $x=0,45$**
- ▶ **e) $T=340$ °C; $P=21,0$ MPa**
- ▶ **f) $T=340$ °C; $P=2,1$ MPa**
- ▶ **g) $T=340$ °C; $P=14,586$ MPa; $x=1,0$**
- ▶ **h) $T=500$ °C; $P=25$ MPa**
- ▶ **i) $P=50$ MPa; $T=25$ °C**

Ex. 3.1) *Utilizando a Tabela A-1.1 ou A-1.2, determine se os estados da água são de líquido comprimido, líquido-vapor, vapor superaquecido ou se estão nas linhas de líquido saturado ou vapor saturado.*

- ▶ **a) $P=1,0$ MPa; $T=207$ °C** → a) Vapor superaquecido
- ▶ **b) $P=1,0$ MPa; $T=107,5$ °C** → b) Líquido comprimido
- ▶ **c) $P=1,0$ MPa; $T=179,91$ °C; $x=0,0$** → c) Líquido saturado
- ▶ **d) $P=1,0$ MPa; $T=179,91$ °C; $x=0,45$** → d) Líquido-Vapor
- ▶ **e) $T=340$ °C; $P=21,0$ MPa** → e) Líquido comprimido
- ▶ **f) $T=340$ °C; $P=2,1$ MPa** → f) Vapor superaquecido
- ▶ **g) $T=340$ °C; $P=14,586$ MPa; $x=1,0$** → g) Vapor saturado
- ▶ **h) $T=500$ °C; $P=25$ MPa** → h) Vapor superaquecido - Fluido
- ▶ **i) $P=50$ MPa; $T=25$ °C** → i) Líquido comprimido - Fluido

- ▶ **Ex. 3.2)** Encontre o volume específico dos estados “b”, “d” e “h” do exercício anterior.

► **Ex. 3.2)** Encontre o volume específico dos estados “b”, “d” e “h” do exercício anterior.

b) $P=1,0 \text{ MPa}; T=107,5 \text{ °C} \rightarrow v \approx v_1=0,001050$
(utilizar referência $T=107,5\text{°C}$)

d) $P=1,0 \text{ MPa}; T=179,91 \text{ °C}; x=0,45 \rightarrow v=0,08812$
 $[v=(1-x)v_1+x(v_v)]$

h) $T=500 \text{ °C}; P=25 \text{ MPa} \rightarrow v=0,011123 \text{ m}^3/\text{kg}$
(Tabela A-1.3 Vapor Superaquecido)

- ▶ **Ex. 3.4)** Amônia a $P=150$ kPa, $T=0$ °C se encontra na região de vapor superaquecido e tem um volume específico e entalpia de $0,8697$ m³/kg e $1469,8$ kJ/kg, respectivamente. Determine sua energia interna específica neste estado.

- **Ex. 3.4)** Amônia a $P=150$ kPa, $T=0$ °C se encontra na região de vapor superaquecido e tem um volume específico e entalpia de $0,8697$ m³/kg e $1469,8$ kJ/kg, respectivamente. Determine sua energia interna específica neste estado.

$$U = 1339,4 \text{ kJ/kg}$$
$$(u = h - P v)$$