

# ZEA0466 TERMODINÂMICA

SUBSTÂNCIAS PURAS



- Composição química:
  - Homogênea e invariável
- Pode existir em mais de uma fase (mesma composição para todas as fases);
- Mistura de gases (ar)
  - Pode exibir características de substâncias puras.



## Substâncias Puras

# Estado da matéria é função das **Propriedades intensivas**

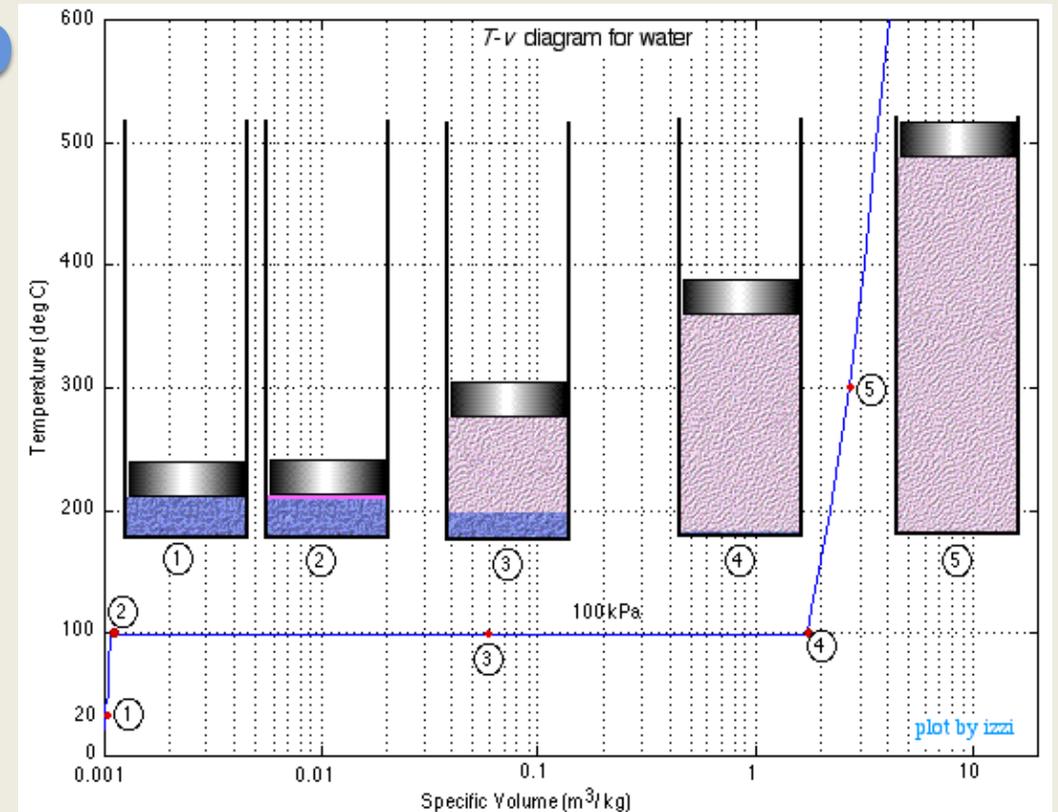
<b>PROPRIEDADE</b>	<b>DEFINIÇÃO</b>	<b>UNIDADE SI</b>
<b>PRESSÃO</b>	$P = \lim_{\delta A \rightarrow \delta A'} \frac{\delta F_{\perp}}{\delta A}$	Pa (1 pascal = 1 N/m <sup>2</sup> )
<b>VOLUME ESPECÍFICO</b>	$v = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V'} \frac{\delta V}{\delta m}$	m <sup>3</sup> / kg
<b>TEMPERATURA</b>	Igualdade de T (Lei Zero da Termodinâmica)	K (kelvin)

## **OBSERVAÇÕES:**

- P e T → opera com valores ABSOLUTOS
- Densidade →  $\rho = 1/v$  (unidade SI: kg/m<sup>3</sup>)
- Grandezas macroscópicas → aquelas que se mede

# Estado de Saturação

- **TEMPERATURA DE SATURAÇÃO DO VAPOR ( $T_{sat}$ )** → para uma dada pressão, é a temperatura na qual ocorre a vaporização
- **PRESSÃO DE SATURAÇÃO DO VAPOR ( $P_{sat}$ )** → para uma dada temperatura, é a pressão na qual ocorre a vaporização

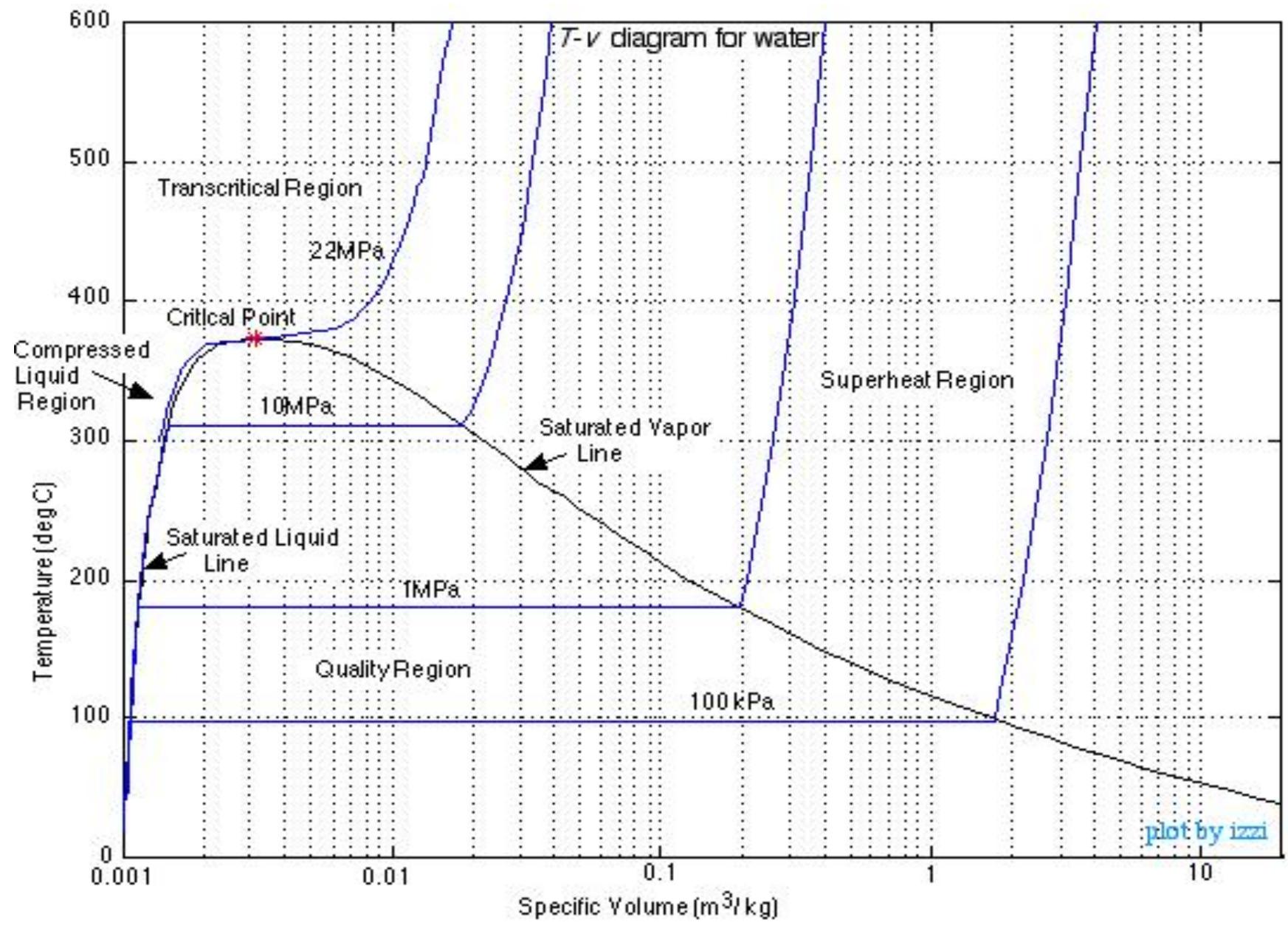


## Água

$$P = 0,1 \text{ MPa} \leftrightarrow T_{sat} = 99,6^\circ\text{C}$$

$$P = 1 \text{ MPa} \leftrightarrow T_{sat} = 179,9^\circ\text{C}$$

$$P = 10 \text{ MPa} \leftrightarrow T_{sat} = 311,1^\circ\text{C}$$



# Estados Característicos

- **Líquido** a  $T < T_{\text{sat}} \rightarrow$  **Líquido Sub-resfriado**
- **Líquido** a  $T = T_{\text{sat}}$  e  $P = P_{\text{sat}} \rightarrow$  **Líquido Saturado**
- **Mistura líquido-vapor:**  $T$  até  $T_{\text{sat}}$  e  $P$  até  $P_{\text{sat}}$   
**(Vapor Úmido)**
- **Vapor** a  $T = T_{\text{sat}}$  e  $P = P_{\text{sat}} \rightarrow$  **Vapor Saturado**
- **Vapor** a  $T > T_{\text{sat}} \rightarrow$  **Vapor Superaquecido**  
**(Vapor Seco)**

# Ponto Crítico

- Estado de líquido saturado  $\equiv$  Estado de vapor saturado

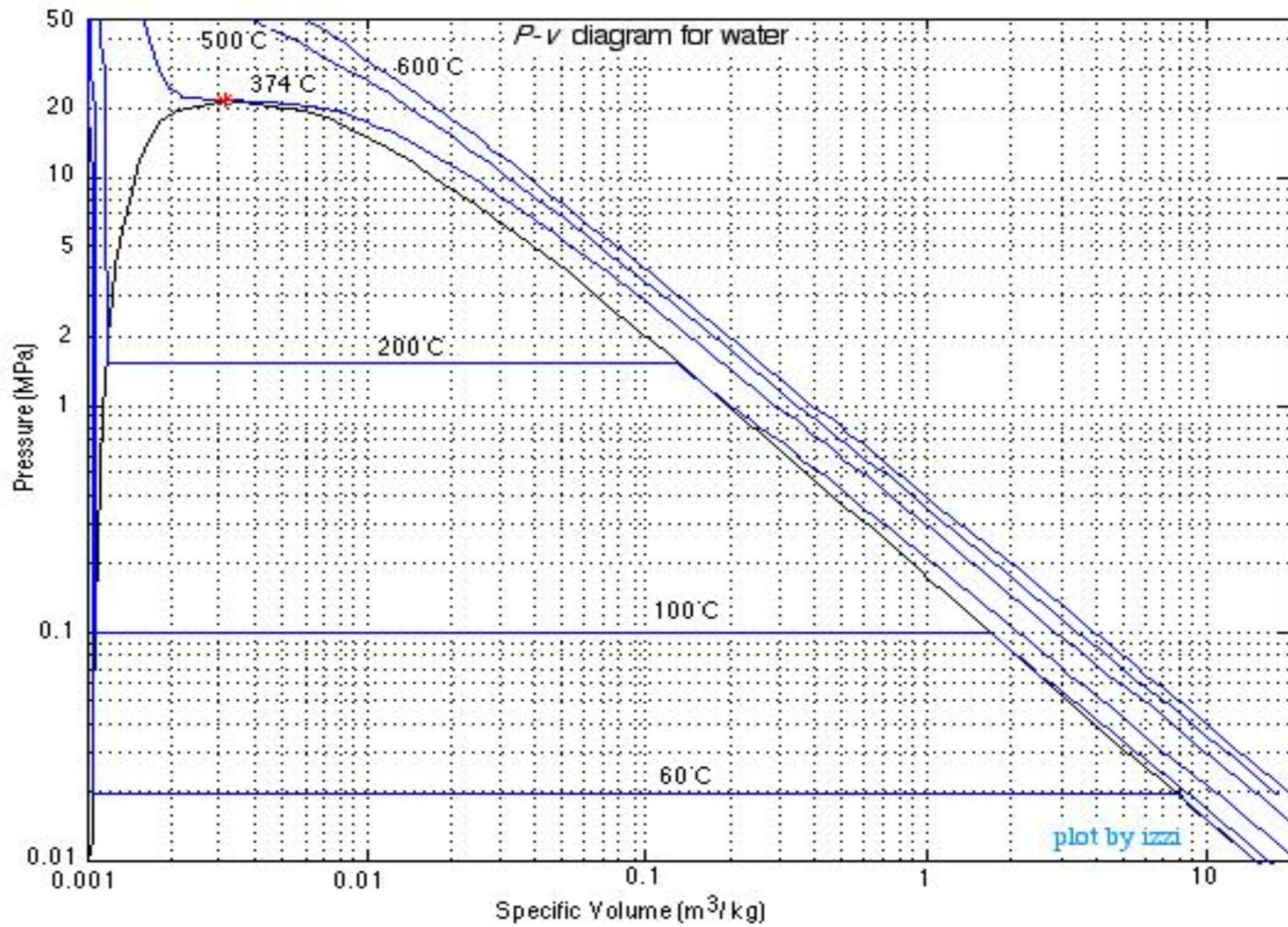


Não há processo de vaporização (ponto de inflexão)

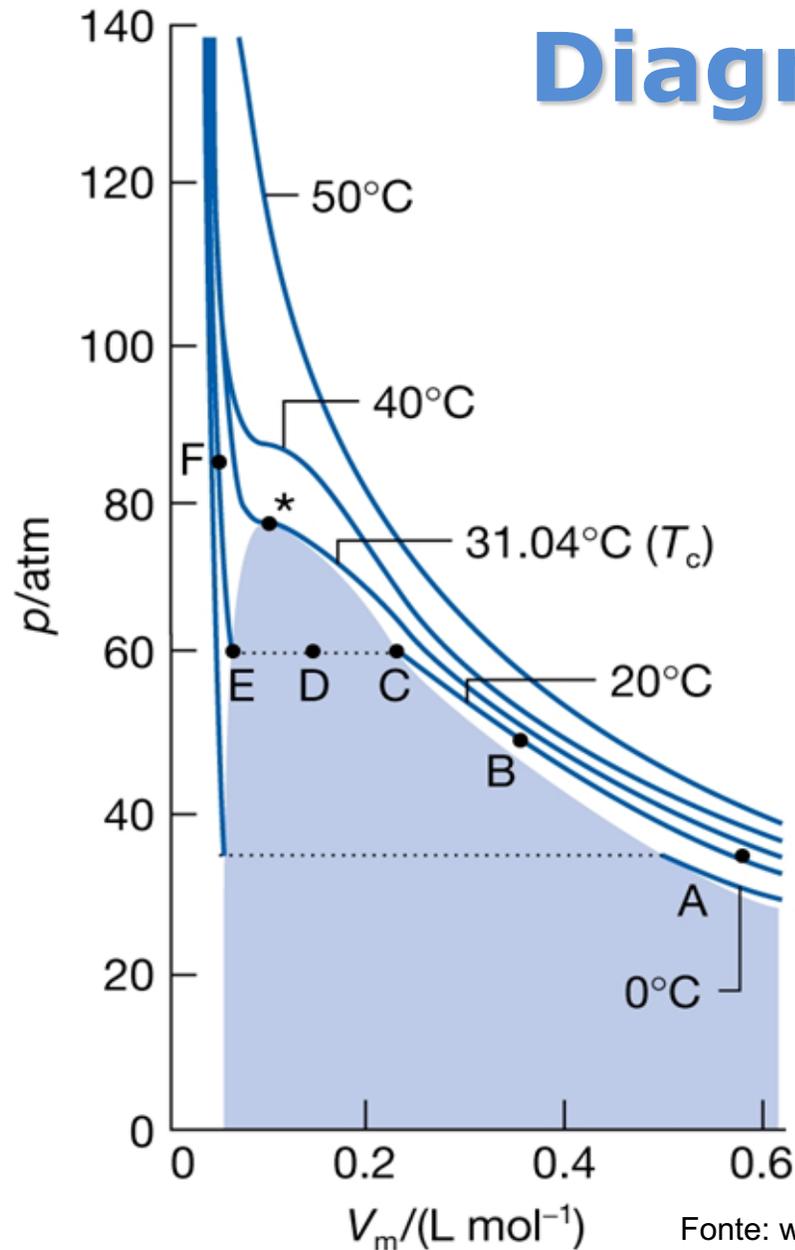


**PONTO CRÍTICO**  $\Rightarrow T = T_{\text{crit}}$  ,  $P = P_{\text{crit}}$  ,  $v = v_{\text{crit}}$

Substância	$T_{\text{crit}}$ (°C)	$P_{\text{crit}}$ (MPa)	$v_{\text{crit}}$ (m <sup>3</sup> /kg)
H <sub>2</sub> O	374,14	22,09	0,003155
CO <sub>2</sub>	31,05	7,39	0,002143
O <sub>2</sub>	-118,35	5,08	0,002438
H <sub>2</sub>	-239,85	1,30	0,032192



# Diagrama P-V<sub>m</sub> (CO<sub>2</sub>)



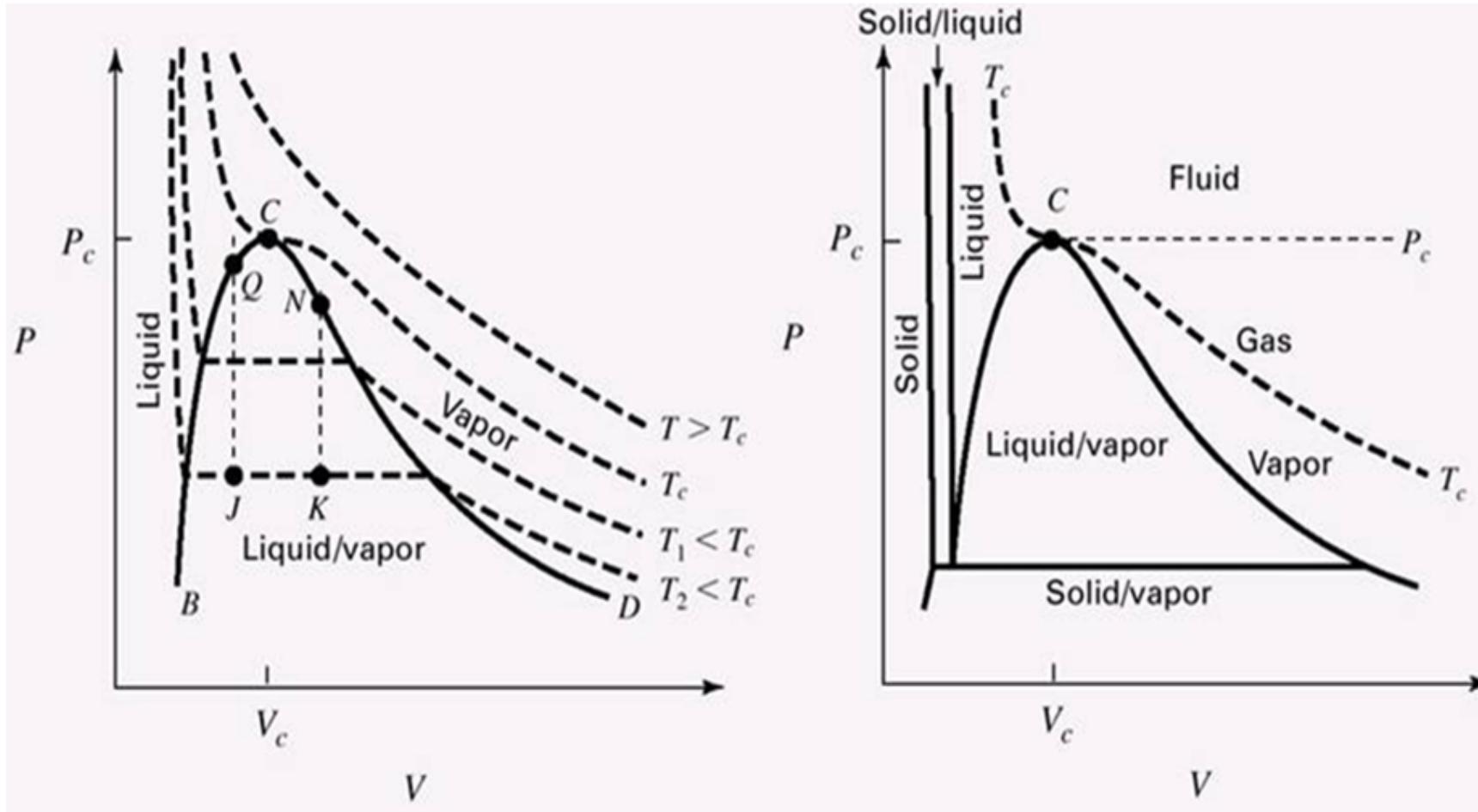
- Volume específico na base molar (ou simplesmente volume molar):

$$V_m = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V'} \frac{\delta V}{\delta n}$$

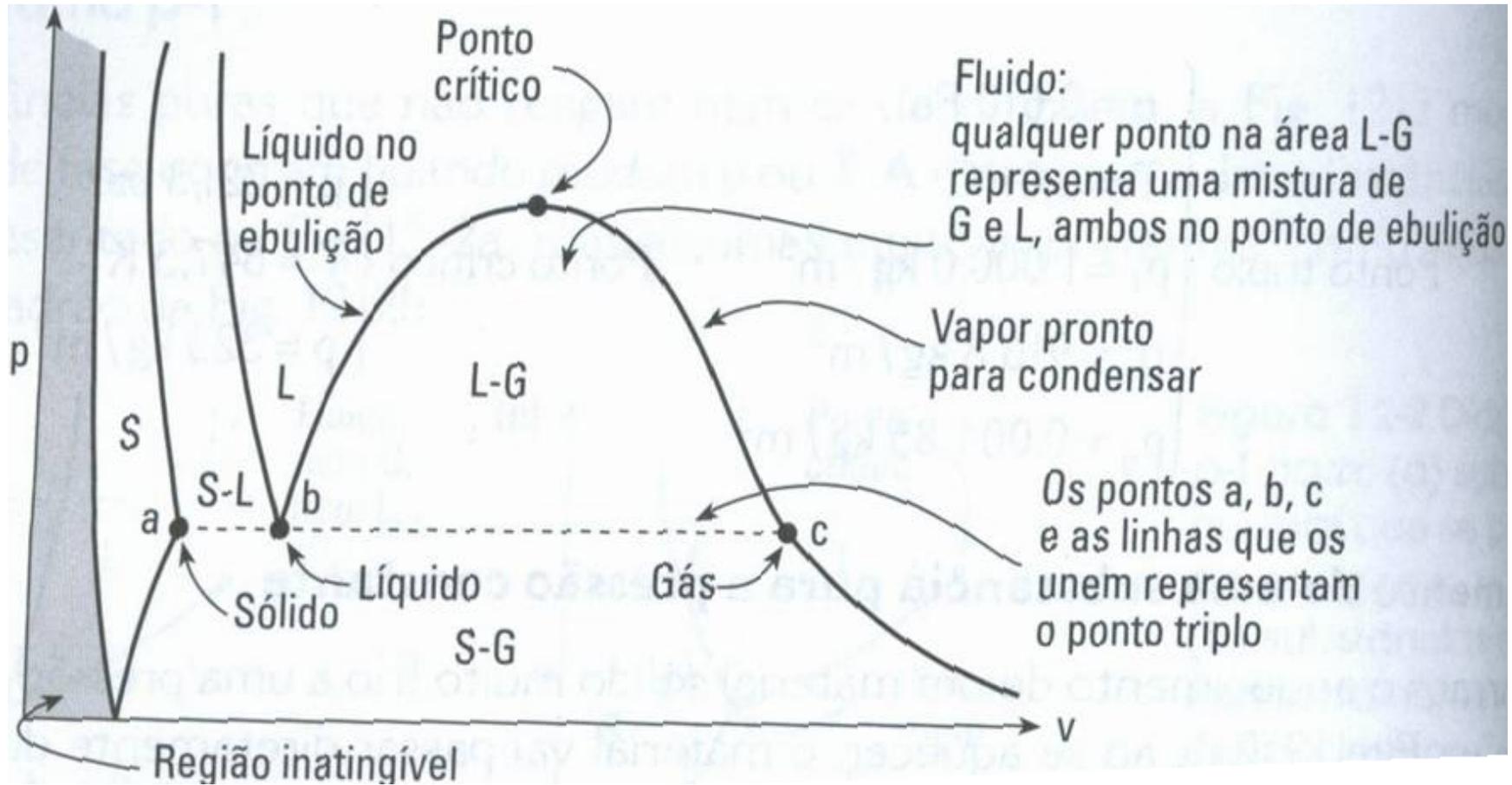
- Notação alternativa

$$\tilde{v} \text{ ou } \bar{v}$$

# Diagrama P-Vm Demais Fases



# Diagrama P-Vm Demais Fases

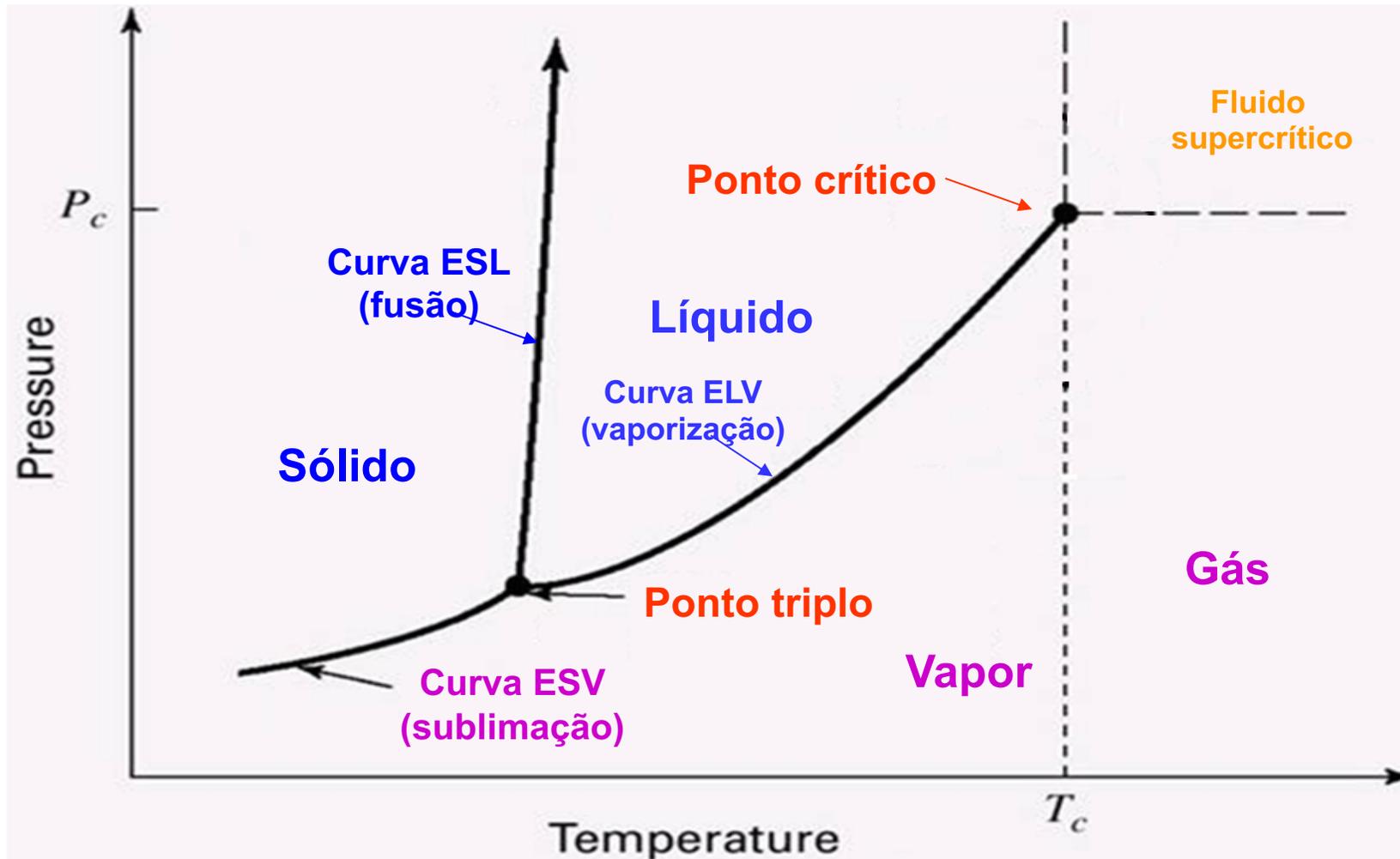


# Ponto Triplo

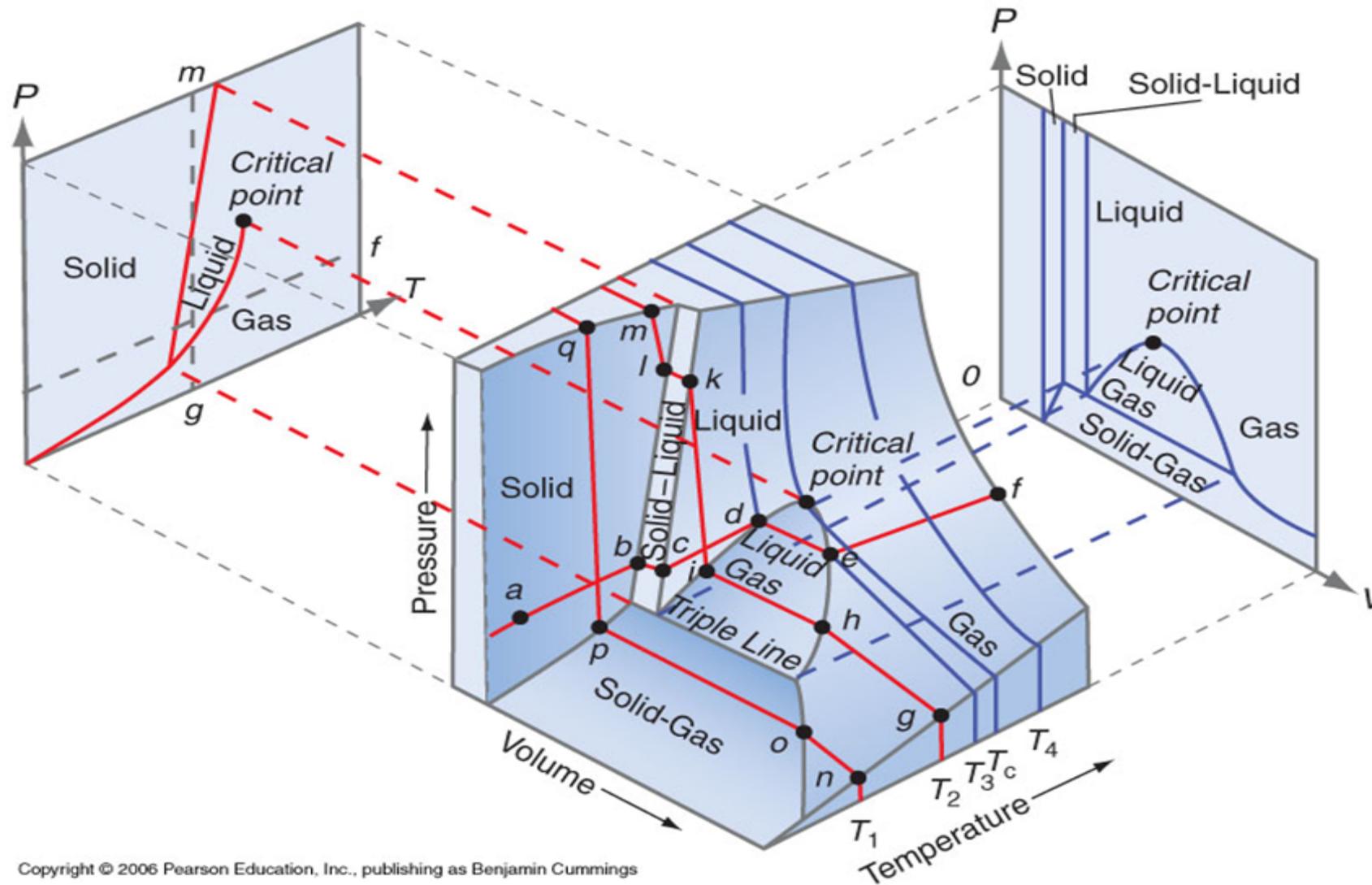
Estado com as 3 fases (sólido - líquido - vapor)  
em equilíbrio

Substância	$T_{\text{ponto-triplo}} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	$P_{\text{ponto-triplo}} \text{ (kPa)}$
H <sub>2</sub>	-259	7,194
O <sub>2</sub>	-219	0,15
N <sub>2</sub>	-210	12,53
CO <sub>2</sub>	-56,4	520,8
Hg	-39	$0,13 \times 10^{-6}$
H <sub>2</sub> O	0,01	0,6113
Zn	419	5,066
Ag	961	0,01
Cu	1083	0,000079

# Diagrama P-T e Equilíbrio de Fases



# Superfícies Termodinâmicas



# Propriedades Independentes

- Estado termodinâmico de substância pura



2 propriedades independentes  $\Rightarrow$  EDE  
(equação de estado)

- Mas lembrando...

- Para líquido saturado e vapor saturado  $\rightarrow T = T_{\text{sat}}$  ,  $P = P_{\text{sat}}$

- Caracterização de estados no equilíbrio líquido-vapor



TÍTULO ("quality")  $\Rightarrow$

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{líquido}} + m_{\text{vapor}}} = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{total}}}$$

# Gases Ideais - EDE

**Observações experimentais sobre comportamento P-V-T de gases a baixas pressões (gases rarefeitos)**



**Combinação de leis empíricas**  $\Rightarrow PV = n\tilde{R}T$

Constante universal dos gases (mesmo valor para  $\forall$  gás):

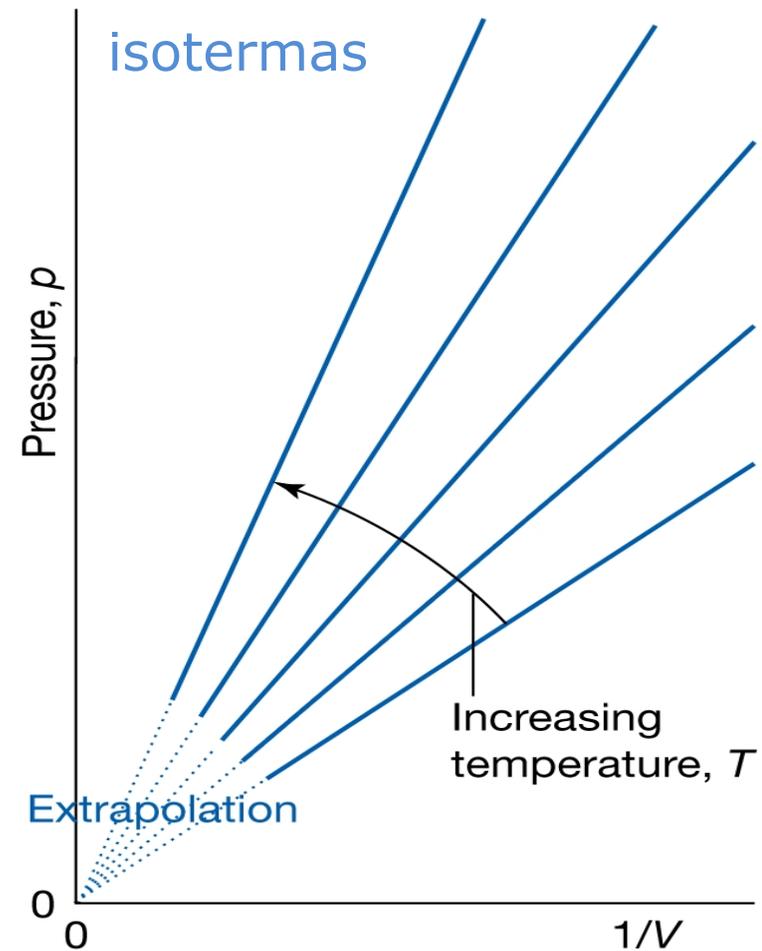
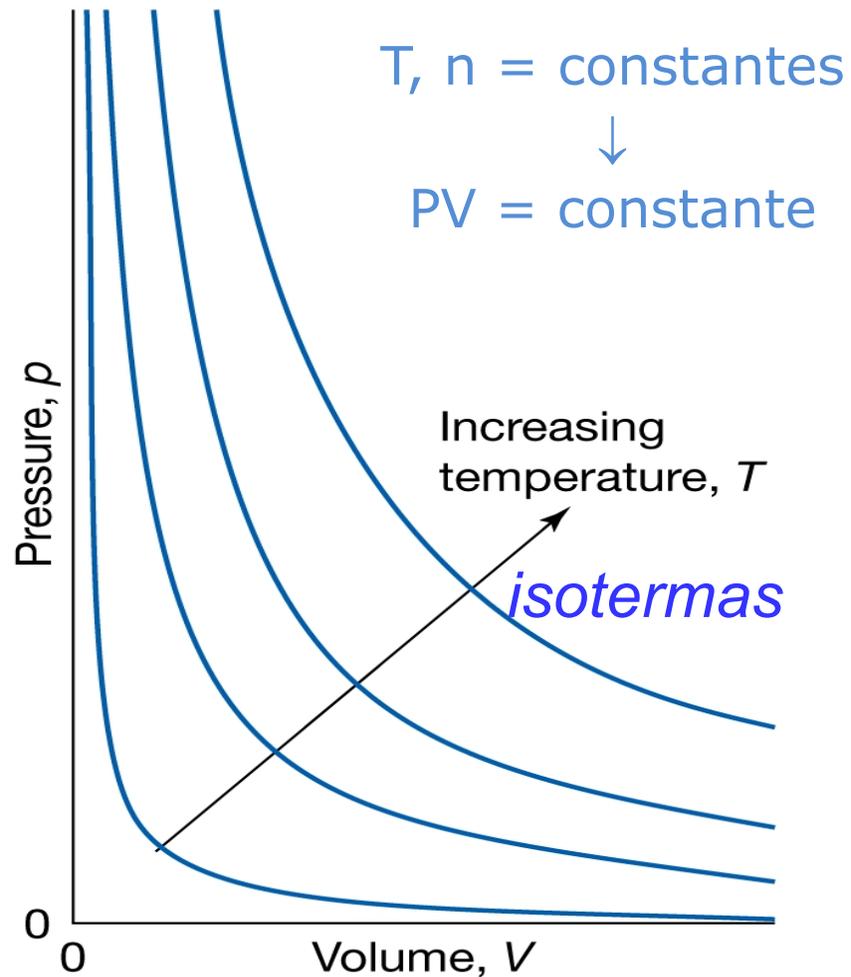
$$\tilde{R} = 8,3145 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} = 0,08206 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 1545 \frac{\text{ft} \cdot \text{lbf}}{\text{lbmol} \cdot \text{R}} = 1,986 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol} \cdot \text{K}}$$

Sendo  $n = m/M_{\text{gas}} \Rightarrow$  reformulação:  $P = \rho R_{\text{gas}} T$  ,  $\rho = \frac{m}{V}$

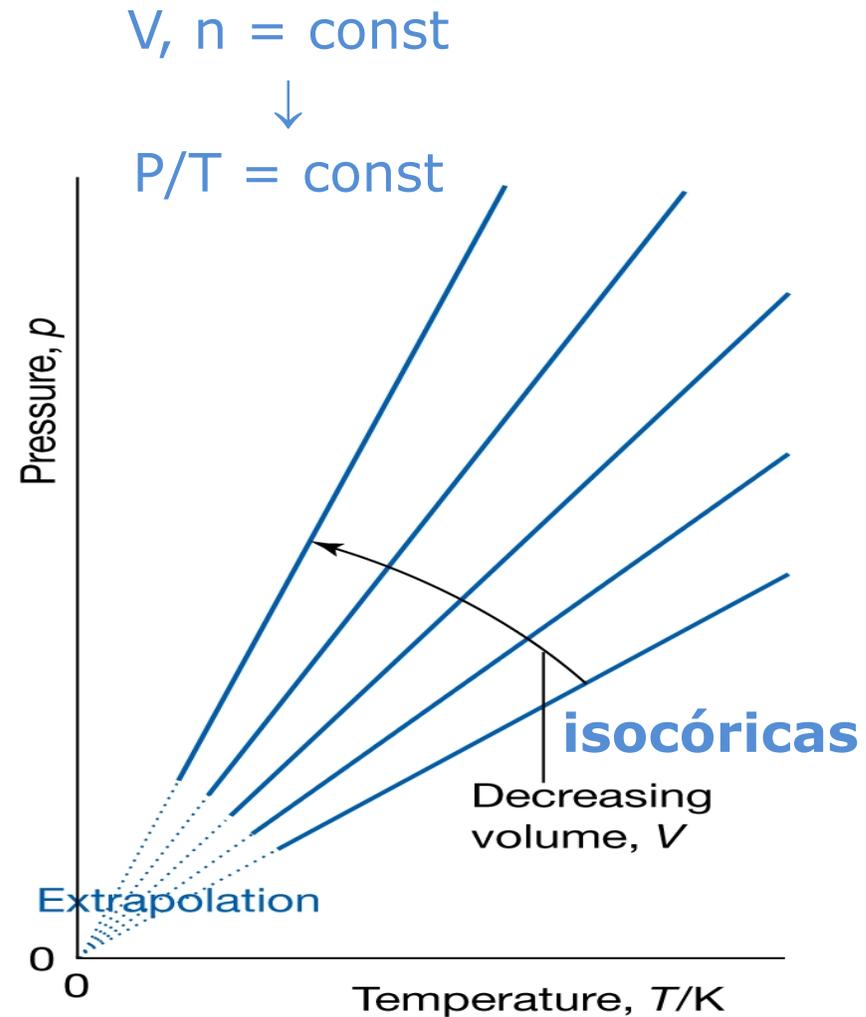
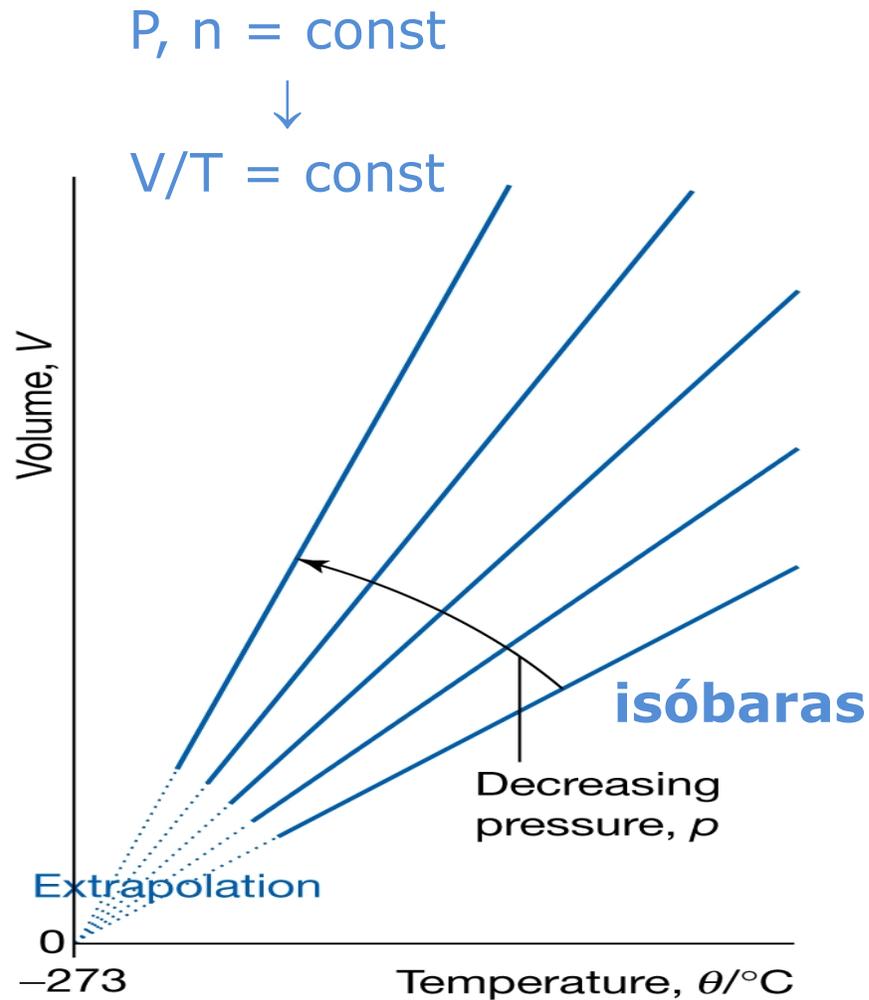
Constante do gás (em particular)  $\rightarrow R_{\text{gás}} = \tilde{R}/M_{\text{gás}}$

(valores diferentes p/ gases distintos!)

# Gases Ideais – Lei de Boyle



# Gases Ideais – Lei de Charles



# Gases Ideais – Princípio de Avogrado

EDE dos gases ideais expressa em termos do **volume molar** (volume específico em base molar):

$$PV = n\tilde{R}T \quad \Rightarrow \quad P \frac{V}{n} = \tilde{R}T \quad \xrightarrow{\tilde{v}=V/n} \quad P\tilde{v} = \tilde{R}T$$

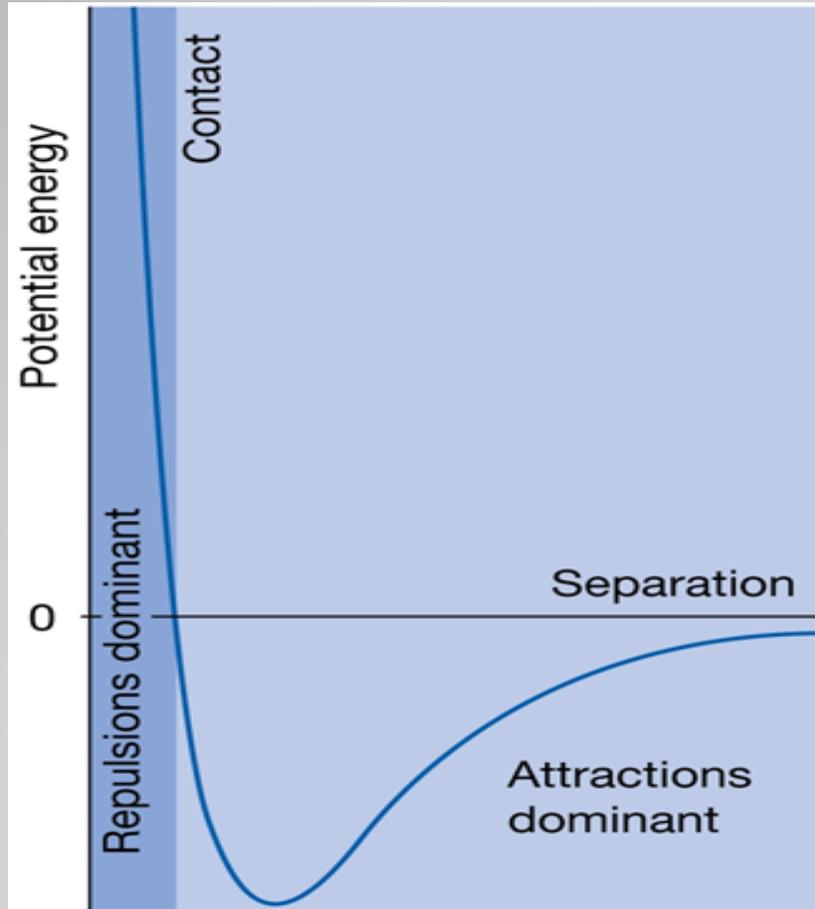
Para gases **distintos** sob as **mesmas** condições de **P** e **T** :

$$\frac{\tilde{R}T}{P} = \tilde{v} = \text{const} \quad \Rightarrow \quad \tilde{v}_{\text{gás 1}} = \tilde{v}_{\text{gás 2}} = \dots$$

## Princípio de Avogadro

V iguais de gases, nas mesmas condições de P e T, contêm o mesmo número de moléculas

# Gases Ideais – Interações Moleculares



Fonte: [www.oup.co.uk/pchem7](http://www.oup.co.uk/pchem7)

- Interações Intermoleculares  $\Rightarrow$  Desvios da Lei dos Gases Ideais
- P baixas  $\Rightarrow$  Gás Ideal
- P intermediárias  $\Rightarrow$  Atração  $\gg$  Repulsão (facilita a compressão)
- P elevadas  $\Rightarrow$  Repulsão  $\gg$  Atração (menos compressível)

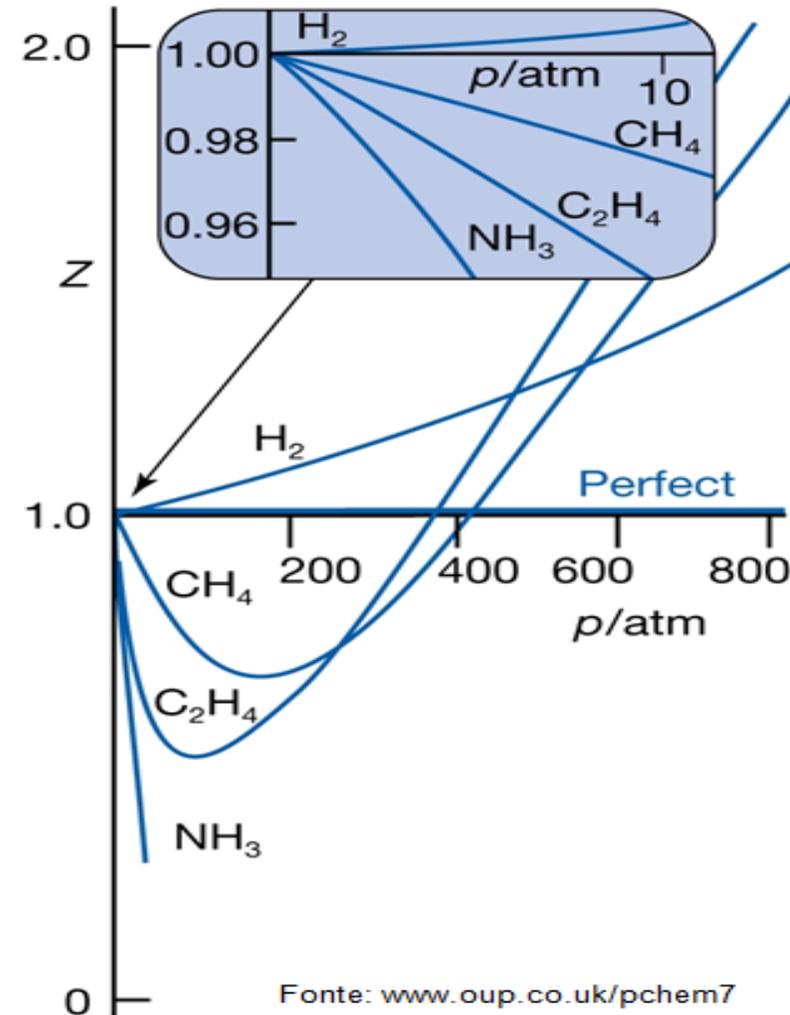
# Fator de compressibilidade (Z)

$$Z = \frac{P\tilde{v}}{\tilde{R}T} \Leftrightarrow P\tilde{v} = Z\tilde{R}T$$

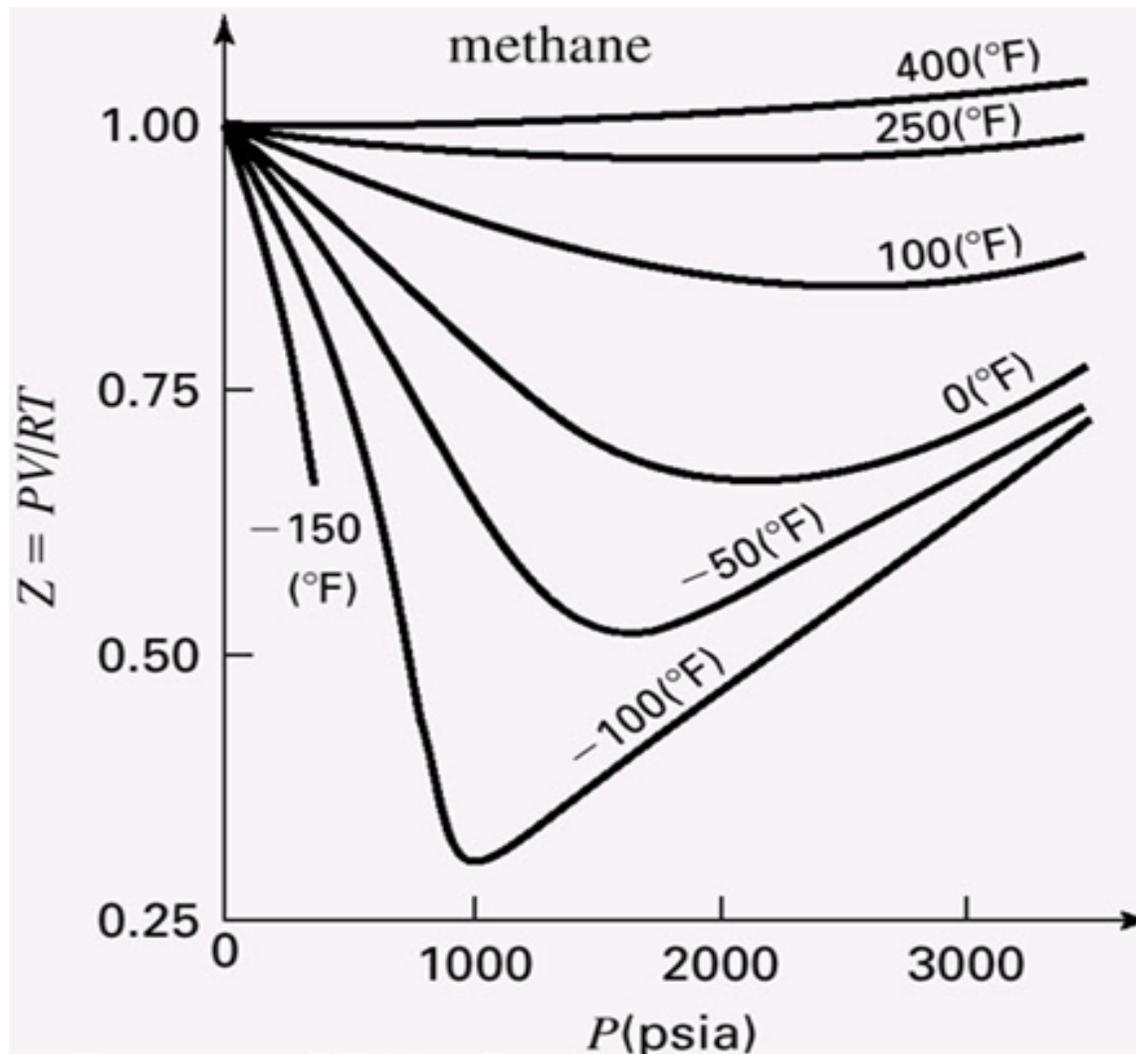
Pressões baixas:  
 $Z \approx 1$   
Gás ideal

Pressões intermediárias:  
 $Z < 1$  (mais fácil compressão)  
Atração dominante

Pressões elevadas:  
 $Z > 1$  (mais difícil compressão)  
Repulsão dominante



# Fator de compressibilidade (Z)



Fator que reflete as propriedades das forças intermoleculares

# Gases Reais

## EDE van der Waals

- A EDE de van der Waals é um modelo matemático criado com base em dados experimentais associados à considerações termodinâmicas (Modelo Termodinâmico).

$$P = \frac{nRT}{V - nb} - a \left( \frac{n}{V} \right)^2$$

- A EDE de van der Waals em termos do volume molar ( $V_m$ ) é:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2}$$

- a e b são as constantes de van der Waals, características para cada gás e independente de T;

# Gases Reais

## EDE van der Waals

- As forças atrativas é proporcional à concentração molar,  $n/V$ , sobre as moléculas no gás. A frequência e a força das colisões são reduzidas pelas forças atrativas. A  $P$  do gás depende da frequência e da força das colisões, então a  $P$  é reduzida proporcionalmente ao quadrado da concentração molar. A redução da pressão é escrita como:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2}$$

Forças Repulsivas

Forças Atrativas

$a$  e  $b$ , são parâmetros empíricos

# Gases Reais

## Equação de Estado

**Forma geral:** 
$$P = \frac{\tilde{R}T}{\tilde{v} - b} - \frac{(\tilde{v} - \eta) \theta}{(\tilde{v} - b) \cdot (\tilde{v}^2 + \kappa\tilde{v} + \lambda)}$$

Autor	Ano	$\theta$	$\eta$	$\kappa$	$\lambda$
van der Waals	1873	$a$	$b$	0	0
Clausius	1880	$a/T$	$b$	$2c$	$c^2$
Berthelot	1899	$a/T$	$b$	0	0
Redlich-Kwong	1949	$a/T^{1/2}$	$b$	$b$	0
Soave	1972	$a_S(T)$	$b$	$b$	0
Lee-Erbar-Edmister	1973	$a_{LEE}(T)$	$\eta(T)$	$b$	0
Peng-Robinson	1976	$a_{PR}(T)$	$b$	$2b$	$-b^2$
Patel-Teja	1981	$a_{PT}(T)$	$b$	$b + c$	$-c \cdot b$

Adaptado de Sandler (2006)

# Gases Reais

## Equação de Estado

- Van der Waals:

$$P = \frac{\tilde{R}T}{\tilde{v} - b} - \frac{a}{\tilde{v}^2}$$

- Peng Robinson:

$$P = \frac{\tilde{R}T}{\tilde{v} - b} - \frac{a(T)}{\tilde{v}(\tilde{v} + b) + b(\tilde{v} - b)}$$

- Redlich-Kong:

$$P = \frac{\tilde{R}T}{\tilde{v} - b} - \frac{a}{T^{1/2} \tilde{v}(\tilde{v} + b)}$$

# Tabelas Termodinâmicas

Estado de **saturação** → **equilíbrio líquido-vapor**

Tabelas organizadas pela **temperatura de saturação**

saturação		volume específico			energia interna			entalpia			entropia		
$T_{\text{sat}}$	$P_{\text{sat}}$	$v_f$	$v_{fg}$	$v_g$	$u_f$	$u_{fg}$	$u_g$	$h_f$	$h_{fg}$	$h_g$	$s_f$	$s_{fg}$	$s_g$

ou

Tabelas organizadas pela **pressão de saturação**

saturação		volume específico			energia interna			entalpia			entropia		
$P_{\text{sat}}$	$T_{\text{sat}}$	$v_f$	$v_{fg}$	$v_g$	$u_f$	$u_{fg}$	$u_g$	$h_f$	$h_{fg}$	$h_g$	$s_f$	$s_{fg}$	$s_g$

# Tabelas Termodinâmicas

Para misturas líquido-vapor:

Determinação do estado com base no **título** ( $x$ )

Exemplo:

$$\text{volume específico} \rightarrow v = (1 - x) \cdot v_f + x \cdot v_g \Leftrightarrow$$

$$v = v_f + x \cdot v_{fg}$$

(raciocínio análogo para demais propriedades  $\Rightarrow u, h, s$ )

**OBS:** Tabelas similares para equilíbrio **sólido-vapor**

**Tabela de vapor saturado - Referência de temperatura**

Temp saturação	Pressão abs	Entalpia espec da água	Entalpia espec de vaporiz	Entalpia espec do vapor	Volume espec da água	Volume espec do vapor	Entropia espec da água	Entropia espec de vaporiz	Entropia espec do vapor
$t_{\text{sat}}$	$P_{\text{abs}}$	$h_f$	$h_{fg}$	$h_g$	$v_f$	$v_g$	$s_f$	$s_{fg}$	$s_g$
°C	bar	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	dm <sup>3</sup> /kg	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg K	kJ/kg K	kJ/kg K
100	1,01	419,10	2256,66	2675,76	1,0437	1,674	1,307	6,048	7,355
105	1,21	440,22	2243,39	2683,61	1,0477	1,420	1,363	5,933	7,296
110	1,43	461,37	2229,93	2691,31	1,0519	1,211	1,419	5,820	7,239
115	1,69	482,57	2216,28	2698,85	1,0562	1,037	1,474	5,710	7,183
120	1,98	503,81	2202,42	2706,23	1,0606	0,892	1,528	5,602	7,130
125	2,32	525,10	2188,33	2713,43	1,0652	0,771	1,582	5,496	7,078
130	2,70	546,44	2174,00	2720,44	1,0700	0,669	1,635	5,393	7,027
135	3,13	567,83	2159,43	2727,26	1,0750	0,582	1,687	5,291	6,978
140	3,61	589,28	2144,59	2733,87	1,0801	0,509	1,739	5,191	6,930
145	4,15	610,78	2129,47	2740,26	1,0853	0,446	1,791	5,093	6,884
150	4,76	632,35	2114,06	2746,41	1,0908	0,393	1,842	4,996	6,838
155	5,43	653,98	2098,34	2752,33	1,0964	0,347	1,893	4,901	6,794
160	6,18	675,69	2082,30	2757,99	1,1022	0,307	1,943	4,807	6,750
165	7,00	697,46	2065,91	2763,38	1,1082	0,273	1,993	4,715	6,708
170	7,91	719,32	2049,17	2768,49	1,1145	0,243	2,042	4,624	6,666
175	8,92	741,26	2032,05	2773,30	1,1209	0,217	2,091	4,534	6,625
180	10,02	763,28	2014,54	2777,82	1,1275	0,194	2,140	4,446	6,585
185	11,22	785,41	1996,61	2782,01	1,1344	0,174	2,188	4,358	6,546
190	12,54	807,63	1978,25	2785,88	1,1415	0,157	2,236	4,271	6,507

## Tabela de vapor saturado - Referência de pressão

Pressão abs	Temp saturação	Entalpia espec da água	Entalpia espec de vaporiz	Entalpia espec do vapor	Volume espec da água	Volume espec do vapor	Entropia espec da água	Entropia espec de vaporiz	Entropia espec do vapor
$P_{abs}$	$t_{sat}$	$h_f$	$h_{fg}$	$h_g$	$v_f$	$v_g$	$s_f$	$s_{fg}$	$s_g$
bar	°C	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	dm <sup>3</sup> /kg	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg K	kJ/kg K	kJ/kg K
1	99,6	417,5	2257,6	2675,2	1,043	1,694	1,303	6,056	7,359
2	120,2	504,8	2201,7	2706,6	1,060	0,886	1,530	5,597	7,127
3	133,6	561,6	2163,7	2725,3	1,073	0,606	1,672	5,320	6,992
4	143,6	604,9	2133,6	2738,6	1,083	0,462	1,777	5,119	6,896
5	151,9	640,4	2108,2	2748,7	1,092	0,375	1,861	4,960	6,821
6	158,9	670,7	2086,0	2756,7	1,100	0,316	1,932	4,829	6,760
7	165,0	697,4	2066,0	2763,4	1,107	0,273	1,993	4,715	6,708
8	170,4	721,3	2047,7	2768,9	1,114	0,240	2,046	4,616	6,663
9	175,4	743,0	2030,7	2773,7	1,120	0,215	2,095	4,527	6,622
10	179,9	762,9	2014,8	2777,8	1,126	0,194	2,139	4,447	6,586
11	184,1	781,4	1999,9	2781,3	1,131	0,177	2,179	4,374	6,553
12	188,0	798,7	1985,7	2784,4	1,137	0,163	2,217	4,306	6,523
13	191,6	815,0	1972,1	2787,1	1,142	0,151	2,252	4,243	6,495
14	195,1	830,3	1959,1	2789,5	1,147	0,141	2,284	4,184	6,468
15	198,3	844,9	1946,7	2791,5	1,152	0,132	2,315	4,129	6,444
16	201,4	858,8	1934,6	2793,4	1,157	0,124	2,344	4,077	6,421
17	204,3	872,0	1923,0	2795,0	1,162	0,117	2,372	4,027	6,399
18	207,2	884,7	1911,7	2796,4	1,166	0,110	2,398	3,980	6,378
19	209,8	897,0	1900,7	2797,7	1,170	0,105	2,423	3,935	6,358

# Tabelas Termodinâmicas

Estado de **vapor superaquecido** → **P** e **T** independentes

Tabelas organizadas pela **pressão**

	$P = P_1 (T_{\text{sat},1})$				$P = P_2 (T_{\text{sat},2})$				$P = P_3 (T_{\text{sat},3})$			
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$	$v$	$u$	$h$	$s$	$v$	$u$	$h$	$s$

**OBS:** Tabelas similares para equilíbrio **líquido comprimido**



Na ausência → **líquido comprimido**  $\approx$  **líquido saturado**

# Tabelas Termodinâmicas

## SUPERHEATED STEAM

v in m <sup>3</sup> /kg, u in kJ/kg, h in kJ/kg, s in kJ/(kg <sup>0</sup> K)								
P= 0.06 bar					P= 0.35 bar			
T	v	u	h	s	v	u	h	s
80	27.13	2487	2650	8.580	4.625	2484	2646	7.756
100	28.68	2516	2688	8.685	4.895	2513	2684	7.863
120	30.22	2545	2726	8.784	5.163	2542	2723	7.964
160	33.30	2603	2802	8.969	5.696	2601	2801	8.152