



## **TEMA 3.**

# **Propiedades termodinámicas de sustancias puras**

1



## **Índice**



- 3.1. Fases de una sustancia pura
- 3.2. Superficies y diagramas de fase
- 3.3. Ecuaciones de estado para gases
- 3.4. Determinación de propiedades mediante ecuaciones
- 3.5. Tablas de propiedades
- 3.6. Transformaciones habituales

2

- 3.1. Fases de una sustancia pura
- 3.2. Superficies y diagramas de fase
- 3.3. Ecuaciones de estado para gases
- 3.4. Determinación de propiedades mediante ecuaciones
- 3.5. Tablas de propiedades
- 3.6. Transformaciones habituales

## Ü 3.1. Fases de una sustancia pura

- Sustancia pura: aquella que posee composición química fija y homogénea.
- Agua: sistema puro, compresible y de composición química uniforme . Es uno de los fluidos más utilizados en la industria.
- Definiciones básicas:
  - Temperatura de saturación.
  - Presión de saturación.
  - Líquido subenfriado.
  - Líquido saturado.
  - Vapor saturado.
  - Vapor húmedo.
  - Vapor sobrecalentado.

- 3.1. Fases de una sustancia pura
- 3.2. Superficies y diagramas de fase
- 3.3. Ecuaciones de estado para gases
- 3.4. Determinación de propiedades mediante ecuaciones
- 3.5. Tablas de propiedades
- 3.6. Transformaciones habituales

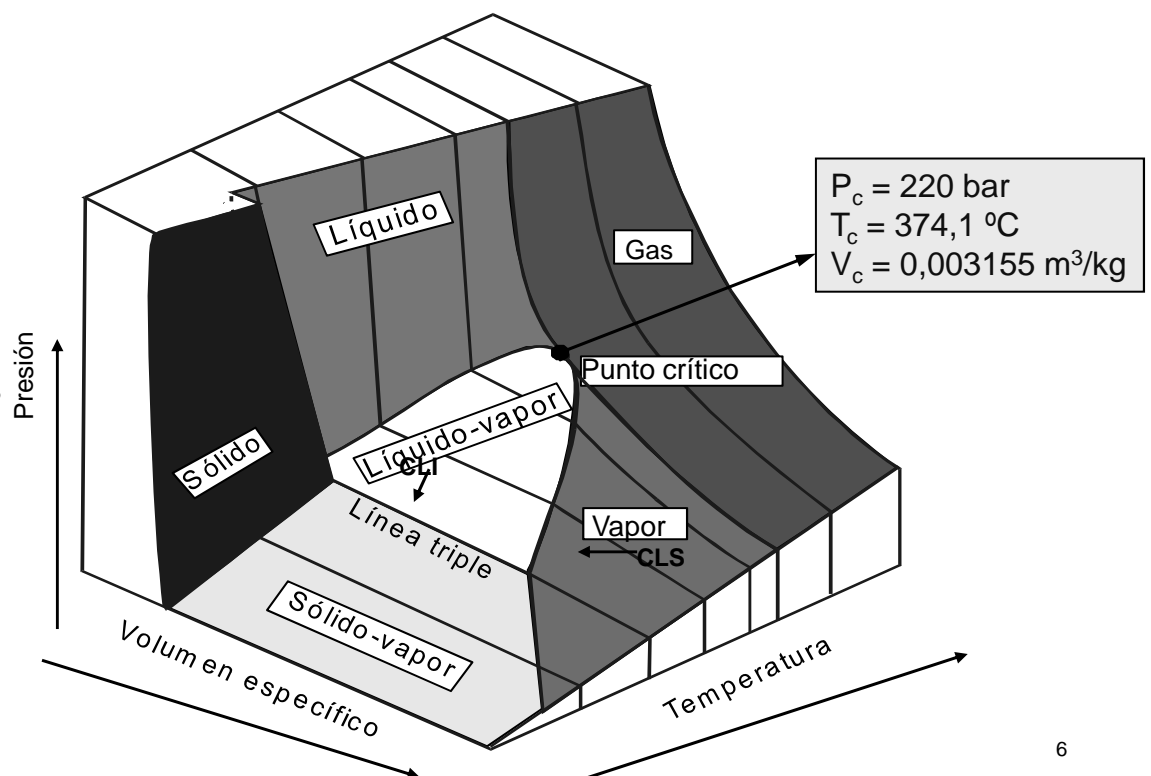
## Ü 3.2. Superficies y diagramas de fase

### 3.2.1. Relación P-v-T

Agua como sistema simple, puro y compresible

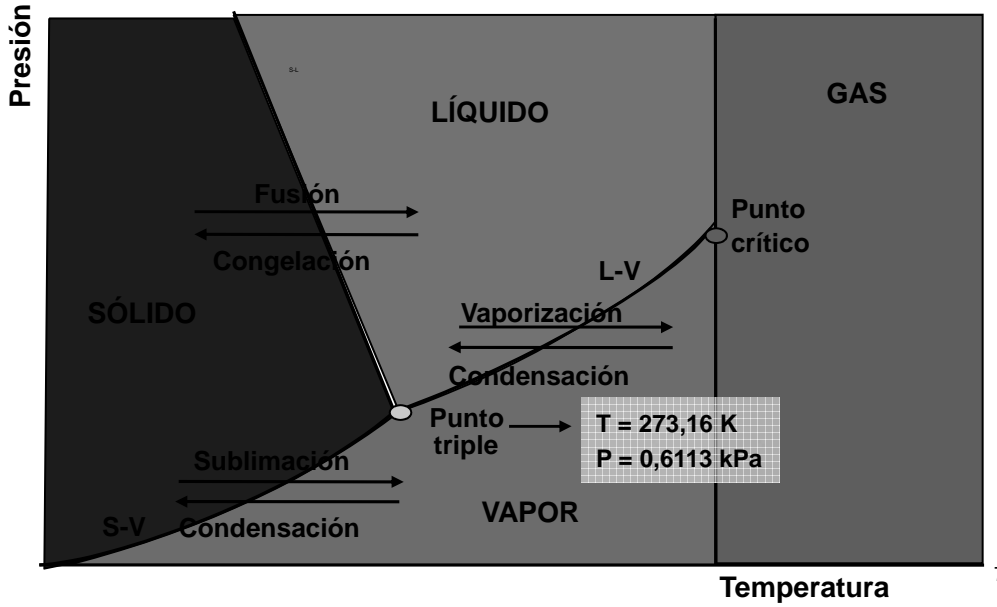


Estado:  
2 propiedades termodinámicas independientes



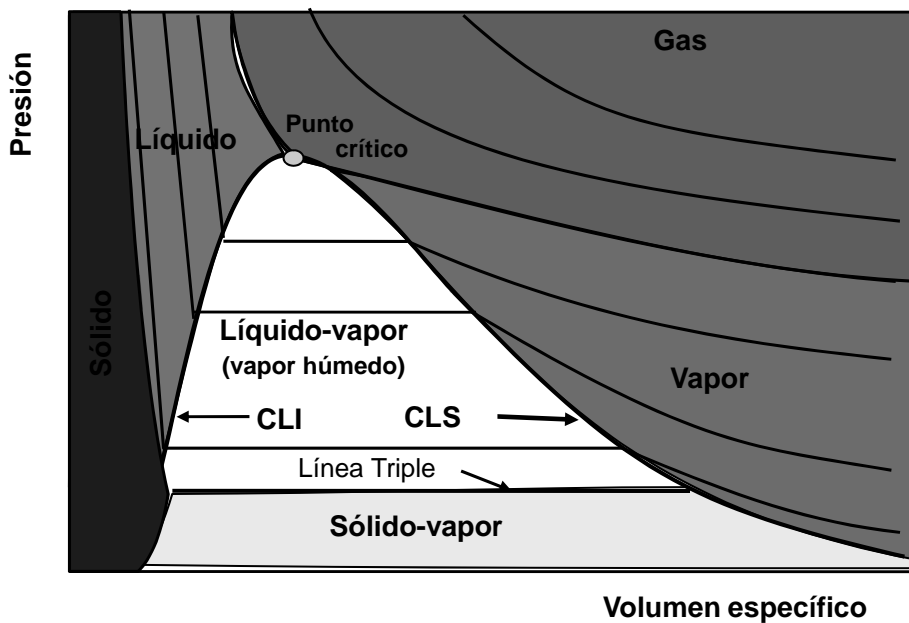
## 3.2.2. Proyecciones de la superficie P-v-T

- Proyección P-T (diagrama de fases)



## 3.2.2. Proyecciones de la superficie P-v-T

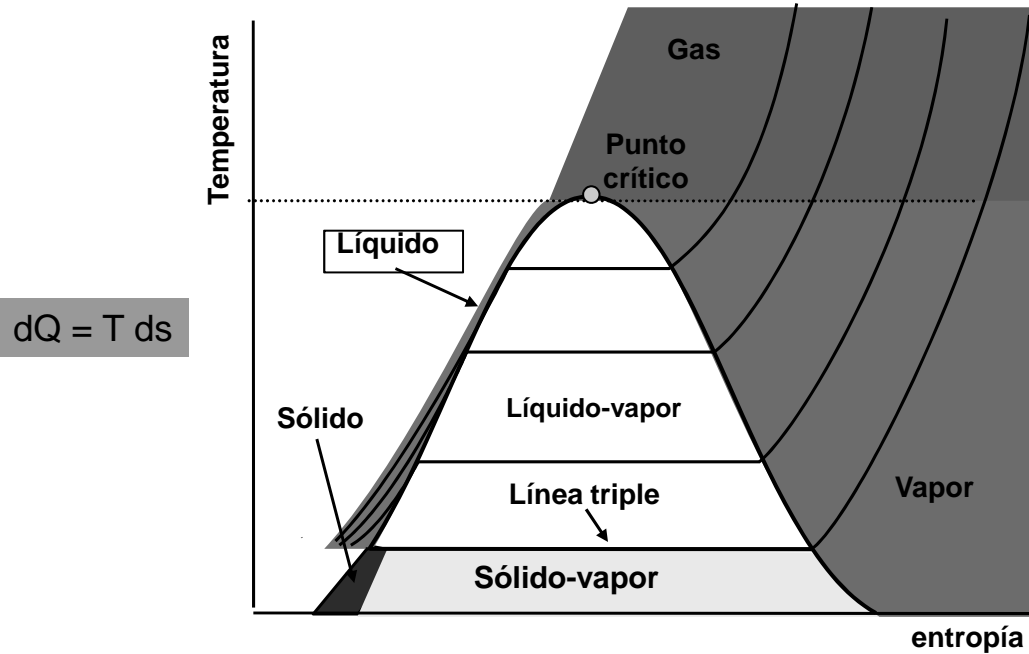
- Proyección P-v



$$dW = p \, dv$$

### 3.2.2. Proyecciones de la superficie P-v-T

- Proyección T-s (T-v)



9

- 3.1. Fases de una sustancia pura
- 3.2. Superficies y diagramas de fase
- 3.3. Ecuaciones de estado para gases
- 3.4. Determinación de propiedades mediante ecuaciones
- 3.5. Tablas de propiedades
- 3.6. Transformaciones habituales

#### Ecuación de estado de gas ideal

- 1662 (Robert Boyle ): la presión de los gases es inversamente proporcional a su volumen.
- 1802 (J. Charles y J. Gay-Lussac ): el volumen de un gas es directamente proporcional a su temperatura.

$$P \cdot v = R \cdot T \quad \text{Siendo:} \quad R = \frac{R_u}{M}$$

Siendo  $R$  la constante de gas y  $R_u$  la constante de gas universal

$$\left. \begin{array}{l} m = M \cdot N \\ V = m \cdot v \end{array} \right\} \Rightarrow P \cdot V = N \cdot R_u \cdot T$$

Para una masa fija de gas ideal:

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

Siendo  $m$  la masa de un sistema,  $M$ , su masa o peso molecular y  $N$  el número de moles

#### Factor de compresibilidad

$$Z = \frac{P \cdot v}{R \cdot T} = \frac{v_{real}}{v_{ideal}}$$

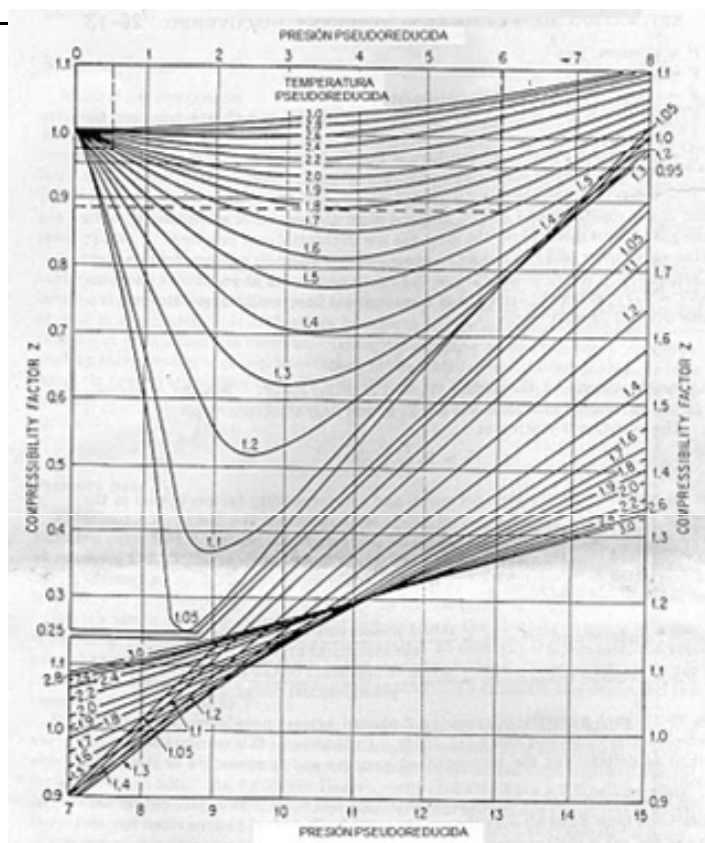
Siendo:

$$v_{ideal} = \frac{R \cdot T}{P}$$

#### Principio de los estados correspondientes

$$P_R = \frac{P}{P_{CR}}$$

$$T_R = \frac{T}{T_{CR}}$$



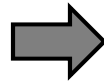
#### Ecuación de van der Waals (1873)

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$$

Siendo:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_{T=T_{CR}=CTE} = 0$$

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2}\right)_{T=T_{CR}=CTE} = 0$$



$$a = \frac{27R^2T_{CR}^2}{64P_{CR}}$$

$$b = \frac{RT_{CR}}{8P_{CR}}$$

#### Ecuación de Beattie-Bridgeman (1928)

$$P = \frac{R_u T}{v} \left(1 - \frac{c}{vT^3}\right) \left(\frac{v}{v_0} + B\right) - \frac{A}{v^2}$$

Siendo:

$$A = A_0 \left(1 - \frac{a}{v}\right)$$

$$B = B_0 \left(1 - \frac{b}{v}\right)$$

Aplicable para  $\rho > 0,8 \rho_{CR}$

#### Ecuación de Benedict-Webb-Rubin (1940)

$$P = \frac{R_u T}{v} + \left(B_0 R_u T - A_0 - \frac{C_0}{T^2}\right) \frac{1}{v^2} + \frac{b R_u T - a}{v^3} + \frac{a \alpha}{v^6} + \frac{c}{v^3 T^2} \left(1 + \frac{\gamma}{v^2}\right) e^{-\frac{\gamma}{v^2}}$$

Aplicable para  $\rho > 2,5 \rho_{CR}$



### Ecuación de estado virial

$$P = \frac{RT}{v} + \frac{a(T)}{v^2} + \frac{b(T)}{v^3} + \frac{c(T)}{v^4} + \dots$$

Siendo  $a(T)$ ,  $b(T)$ ,  $c(T)$ , etc., los **coeficientes viriales**



- 3.1. Fases de una sustancia pura
- 3.2. Superficies y diagramas de fase
- 3.3. Ecuaciones de estado para gases
- 3.4. Determinación de propiedades mediante ecuaciones
- 3.5. Tablas de propiedades
- 3.6. Transformaciones habituales





## 3.4. Determinación de propiedades mediante ecuaciones



### 3.4.1. Líquido subenfriado

#### a) Volumen específico

Simplificación: fluido incompresible respecto a la presión



Incongruencia: transformación isoterma

$$\varepsilon \approx 0 \quad ; \text{ si } T_1 = T_2 \quad \Rightarrow \quad W_{12} = \int_{v_1}^{v_2} P \, dv = 0 \quad [3.1]$$

17



## 3.4. Determinación de propiedades mediante ecuaciones



### 3.4.1. Líquido subenfriado

#### b) Capacidad calorífica

Para sustancias puras y compresibles:

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad [3.2]$$

Simplificación 1:

$$c_v \approx \phi_2(T)$$

Simplificación 2: Agua líquida incompresible

$$c_p = c_v = f(T) =$$

$$= a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + \dots + a_n T^{n-1}$$

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad [3.3]$$

$$c_p \approx f_2(T)$$

[3.4]

18



### 3.4. Determinación de propiedades mediante ecuaciones



#### 3.4.1. Líquido subenfriado

##### c) Calor

Calor intercambiado en una transformación isobara:

$$q = \int_1^2 c_p(T) dT = \int_1^2 (a_1 + a_2 T + \dots + a_n T^{n-1}) dT = \left[ a_1 T + \frac{a_2 T^2}{2} + \dots + \frac{a_n T^n}{n} \right]_1^2 = h_2 - h_1 \quad [3.5]$$

##### d) Entropía

Variación de entropía en una transformación reversible:

$$ds = \frac{dq}{T} \Rightarrow \left[ s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_1^2 c_p \frac{dT}{T} = \left[ a_1 \ln T + a_2 T + a_3 \frac{T^2}{2} + \dots + a_n \frac{T^{n-1}}{n-1} \right]_1^2 \right] \quad [3.6]$$

19



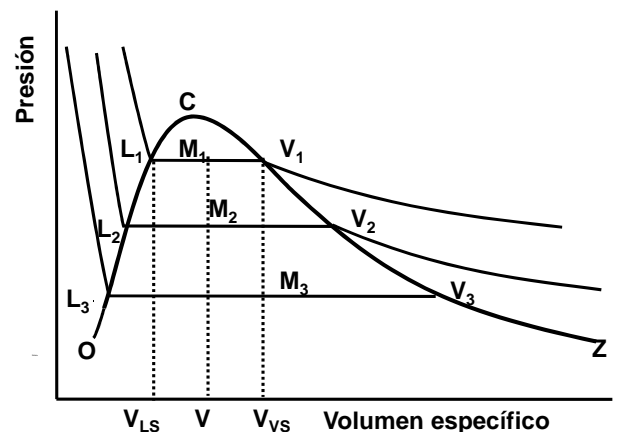
### 3.4. Determinación de propiedades mediante ecuaciones



#### 3.4.2. Vapor húmedo

##### a) Título o calidad

$$x = \frac{\text{kg de vapor saturado seco}}{\text{kg de vapor húmedo}} \quad [3.7]$$



##### b) Volumen específico

$$v_x = v_{LS}(1-x) + v_{VS}x \quad [3.8]$$

20

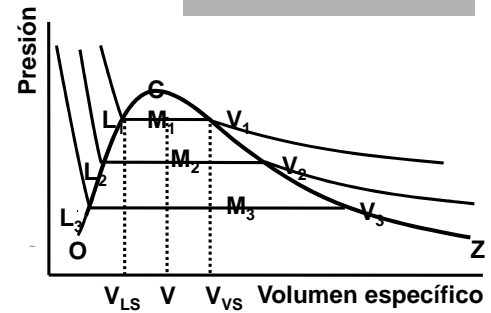


### 3.4. Determinación de propiedades mediante ecuaciones



#### 3.4.2. Vapor húmedo

##### c) Calor de evaporación



$$\lambda = \int_{L_1}^{V_1} dq = \int_{L_1}^{V_1} dh = \int_{L_1}^{V_1} du + \int_{L_1}^{V_1} P dv = \rho + P_s(v_{VS} - v_{LS}) = h_{VS} - h_{LS} \quad [3.9]$$

Evaporación parcial:

$$\lambda_x = \lambda x \quad [3.10]$$

##### d) Entropía de vaporización

$$s_{L_1-V_1} = \int_{L_1}^{V_1} \frac{dq}{T_s} = \int_{L_1}^{V_1} \frac{d\lambda}{T_s} = \frac{\lambda}{T_s} \quad [3.11]$$

Evaporación parcial:  $s_x = \frac{\lambda x}{T_s} \quad [3.12]$



### 3.4. Determinación de propiedades mediante ecuaciones



#### 3.4.3. Vapor sobrecalentado

##### a) Volumen específico

Ecuaciones de estado experimentales

$$v = f(T, P)$$

Ej. Ecuación de Eichelberg:

$$Pv = RT - \frac{2P}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2/3}} - \frac{1900\left(\frac{P}{10000}\right)^3}{\left(\frac{T}{100}\right)^{14}}$$

P: kg/cm<sup>2</sup>  
T: K  
V: m<sup>3</sup>/kg  
R: 47,07 kgm/kg K

[3.13]

##### b) Calor y entropía

Vapor: Gas no ideal ni incomprensible  $\rightarrow c_p \neq c_v$

Recalentamiento a P = cte.  $c_p = f(T, P)$

Ej. Ecuación de Knoblanck:  $c_p = f(T) + \frac{20,33}{T - \varphi(P)}$

C<sub>p</sub>: kcal/kg K  
T: K

[3.14]  
22

- 3.1. Fases de una sustancia pura
- 3.2. Superficies y diagramas de fase
- 3.3. Ecuaciones de estado para gases
- 3.4. Determinación de propiedades mediante ecuaciones
- 3.5. Tablas de propiedades
- 3.6. Transformaciones habituales

## Ü 3.5. Tablas de propiedades

### 3.5.1 Propiedades del agua

#### A. Descripción de las tablas



- ✓ Tabla de presiones: A-1
- ✓ Tabla de temperaturas: A-2
- ✓ Vapor recalentado: A-3
- ✓ Líquido subenfriado: A-4
- ✓ Sólido-vapor : A-5

#### B. Estados de referencia

Tablas de vapor: agua líquida saturada a 0,01 °C ( $P_s = 0,611$  kPa).

#### C. Aproximaciones en líquidos subenfriados

$$v(T,P) \approx v_{LS}(T)$$

$$u(T,P) \approx u_{LS}(T)$$

$$h(T,P) \approx u_{LS}(T) + pv_{LS}(T)$$

TABLA A-1. Propiedades del agua saturada: líquido – vapor. Tabla de Presiones

P (kPa)	T (°C)	v (m <sup>3</sup> /kg)		u (kJ/kg)		h (kJ/kg)		s (kJ/kg K)		
P <sub>s</sub>	T <sub>s</sub>	Líquido saturado v <sub>ls</sub> x 10 <sup>3</sup>	Vapor saturado v <sub>vs</sub>	Líquido saturado u <sub>ls</sub>	Vapor saturado u <sub>vs</sub>	Líquido saturado h <sub>ls</sub>	Vaporización λ	Vapor saturado h <sub>vs</sub>	Líquido saturado s <sub>ls</sub>	Vapor saturado s <sub>vs</sub>
0,611	0,01	1,0002	206,136	0,00	2375,3	0,01	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562
1	6,98	1,0000	129,21	29,3	2385,0	29,30	2484,9	2514,2	0,1059	8,9756
2	17,50	1,0010	67,000	73,48	2399,5	73,48	2460,0	2533,5	0,2607	8,7237
4	28,96	1,0040	34,800	121,45	2415,2	121,46	2432,9	2554,4	0,4226	8,4746
6	36,16	1,0064	23,739	151,53	2425,0	151,53	2415,9	2567,4	0,5210	8,3304
8	41,51	1,0084	18,103	173,87	2432,2	173,88	2403,1	2577,0	0,5926	8,2287
10	45,81	1,0102	14,674	191,82	2437,9	191,83	2392,8	2584,7	0,6493	8,1502
20	60,06	1,0172	7,649	251,38	2456,7	251,40	2358,3	2609,7	0,8320	7,9085
30	69,10	1,0223	5,229	289,20	2468,4	289,23	2336,1	2625,3	0,9439	7,7686
40	75,87	1,0265	3,993	317,53	2477,0	317,58	2319,2	2636,8	1,0259	7,6700
50	81,33	1,0300	3,240	340,44	2483,9	340,49	2305,4	2645,9	1,0910	7,5939
60	85,94	1,0331	2,732	359,79	2489,6	359,86	2293,6	2653,5	1,1453	7,5320
70	89,95	1,0360	2,365	376,63	2494,5	376,70	2283,3	2660,0	1,1919	7,4797
80	93,50	1,0380	2,087	391,58	2498,8	391,66	2274,1	2665,8	1,2329	7,4346
90	96,71	1,0410	1,869	405,06	2502,6	405,15	2265,7	2670,9	1,2695	7,3949
100	99,63	1,0432	1,694	417,36	2506,1	417,46	2258,0	2675,5	1,3026	7,3594
150	111,4	1,0528	1,159	466,94	2519,7	467,11	2226,5	2693,6	1,4336	7,2233
200	120,2	1,0605	0,8857	504,49	2529,5	504,70	2201,9	2706,7	1,5301	7,1271
250	127,4	1,0672	0,7187	535,10	2537,2	535,37	2181,5	2716,9	1,6072	7,0527
300	133,6	1,0732	0,6058	561,15	2543,6	561,47	2163,8	2725,3	1,6718	6,9919
350	138,9	1,0786	0,5243	583,95	2546,9	584,33	2148,1	2732,4	1,7275	6,9405
400	143,6	1,0836	0,4625	604,31	2553,6	604,74	2133,8	2738,6	1,7766	6,8959
450	147,9	1,0882	0,4140	622,25	2557,6	623,25	2120,7	2743,9	1,8207	6,8565
500	151,9	1,0926	0,3749	639,68	2561,2	640,23	2108,5	2748,7	1,8607	6,8212
600	158,9	1,1006	0,3157	669,90	2567,4	670,56	2086,3	2756,8	1,9312	6,7600

TABLA A-2. Propiedades del agua saturada: líquido – vapor. Tabla de Temperaturas

T (°C)	P (kPa)	v (m <sup>3</sup> /kg)		u (kJ/kg)		h (kJ/kg)		s (kJ/kg K)		
T <sub>s</sub>	P <sub>s</sub>	Líquido saturado v <sub>ls</sub> x 10 <sup>3</sup>	Vapor saturado v <sub>vs</sub>	Líquido saturado u <sub>ls</sub>	Vapor saturado u <sub>vs</sub>	Líquido saturado h <sub>ls</sub>	Vaporización λ	Vapor saturado h <sub>vs</sub>	Líquido saturado s <sub>ls</sub>	Vapor saturado s <sub>vs</sub>
0,01	0,6110	1,0002	206,136	0,00	2375,3	0,01	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562
4	0,8130	1,0001	157,232	16,77	2380,9	16,78	2491,9	2508,7	0,0610	9,0514
5	0,8720	1,0001	147,120	20,97	2382,3	20,98	2489,6	2510,6	0,0761	9,0257
6	0,9350	1,0001	137,734	25,19	2383,6	25,20	2487,2	2512,4	0,0912	9,0003
8	1,0720	1,0002	120,917	33,59	2386,4	33,60	2482,5	2516,1	0,1212	8,9501
10	1,2280	1,0004	106,379	42,00	2389,2	42,01	2477,7	2519,8	0,1510	8,9008
11	1,3120	1,0004	99,857	46,20	2390,5	46,20	2475,4	2521,6	0,1658	8,8765
12	1,4020	1,0005	93,784	50,41	2391,9	50,41	2473,0	2523,4	0,1806	8,8524
13	1,4970	1,0007	88,124	54,60	2393,3	54,60	2470,7	2525,3	0,1953	8,8285
14	1,5980	1,0008	82,848	58,79	2394,7	58,80	2468,3	2527,1	0,2099	8,8048
15	1,7050	1,0009	77,926	62,99	2396,1	62,99	2465,9	2528,9	0,2245	8,7814
16	1,8180	1,0011	73,333	67,18	2397,4	67,19	2463,6	2530,8	0,2390	8,7582
17	1,9380	1,0012	69,044	71,38	2398,8	71,38	2461,2	2532,6	0,2535	8,7351
18	2,0640	1,0014	65,038	75,57	2400,2	75,58	2458,8	2534,4	0,2679	8,7123
19	2,1980	1,0016	61,293	79,76	2401,6	79,77	2456,5	2536,2	0,2823	8,6897
20	2,3390	1,0018	57,791	83,95	2402,9	83,96	2454,1	2538,1	0,2966	8,6672
21	2,4870	1,0020	54,514	88,14	2404,3	88,14	2451,8	2539,9	0,3109	8,6450
22	2,6450	1,0022	51,447	92,32	2405,7	92,33	2449,4	2541,7	0,3251	8,6229
23	2,8100	1,0024	48,574	96,51	2407,0	96,52	2447,0	2543,5	0,3393	8,6011
24	2,9850	1,0027	45,883	100,70	2408,4	100,70	2444,7	2545,4	0,3534	8,5794
25	3,1690	1,0029	43,360	104,88	2409,8	104,89	2442,3	2547,2	0,3674	8,5580
26	3,3630	1,0032	40,994	109,06	2411,1	109,07	2439,9	2549,0	0,3814	8,5361
27	3,5670	1,0035	38,774	113,25	2412,5	113,25	2437,6	2550,8	0,3954	8,5156

TABLA A-3. Propiedades del agua saturada: vapor sobrecalentado

T °C	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
P = 6 kPa; T <sub>sat</sub> = 36,2°C					P = 35 kPa; T <sub>sat</sub> = 72,7°C			
Sat.	23,739	2425,0	2567,4	8,3304	4,526	2473,0	2631,4	7,7158
80	27,132	2487,3	2650,1	8,5804	4,625	2483,7	2645,6	7,7564
120	30,219	2544,7	2726,0	8,7840	5,163	2542,4	2723,1	7,9644
160	33,302	2602,7	2802,5	8,9693	5,696	2601,2	2800,6	8,1519
200	36,383	2661,4	2879,7	9,1398	6,228	2660,4	2878,4	8,3237
240	39,462	2721,0	2957,8	9,2982	6,758	2720,3	2956,8	8,4828
280	42,540	2781,5	3036,8	9,4464	7,287	2780,9	3036,0	8,6314
320	45,618	2843,0	3116,7	9,5859	7,815	2842,5	3116,1	8,7712
360	48,696	2905,5	3197,7	9,7180	8,344	2905,1	3197,1	8,9034
400	51,774	2969,0	3279,6	9,8435	8,872	2968,6	3279,2	9,0291
440	54,851	3033,5	3362,6	9,9633	9,400	3033,2	3362,2	9,1490
500	59,467	3132,3	3489,1	10,1336	10,192	3132,1	3488,8	9,3194
P = 70 kPa; T <sub>sat</sub> = 89,9°C					P = 100 kPa; T <sub>sat</sub> = 99,6°C			
Sat.	2,365	2494,5	2660,0	7,4797	1,694	2506,1	2675,5	7,3594
100	2,434	2509,7	2680,0	7,5341	1,696	2506,7	2676,2	7,3614
120	2,571	2539,7	2719,6	7,6375	1,793	2537,3	2716,6	7,4668
160	2,841	2599,4	2798,2	7,8279	1,984	2597,8	2796,2	7,6597
200	3,108	2659,1	2876,7	8,0012	2,172	2658,1	2875,3	7,8343
240	3,374	2719,3	2955,5	8,1611	2,359	2718,5	2954,5	7,9949
280	3,640	2780,2	3035,0	8,3162	2,546	2779,6	3034,2	8,1445
320	3,905	2842,0	3115,3	8,4504	2,732	2841,5	3114,6	8,2849
360	4,170	2904,6	3196,5	8,5828	2,917	2904,2	3195,9	8,4175
400	4,434	2968,2	3278,6	8,7086	3,103	2967,9	3278,2	8,5435

TABLA A-4. Tabla del agua saturada: líquido subenfriado

T °C	v 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
P = 2500 kPa; T <sub>sat</sub> = 223,99°C					P = 5000 kPa; T <sub>sat</sub> = 263,99°C			
20	1,0006	83,80	96,30	0,2961	0,9995	83,65	88,65	0,2956
40	1,0067	167,25	169,77	0,5715	1,0056	166,95	171,97	0,5705
90	1,0280	334,29	336,86	1,0737	1,0268	333,72	338,85	1,0720
100	1,0423	418,24	420,85	1,3050	1,0410	417,52	422,72	1,3030
140	1,0784	587,82	590,52	1,7369	1,0768	586,76	592,15	1,7343
180	1,1261	761,16	763,97	2,1375	1,1240	759,63	765,25	2,1341
200	1,1555	849,90	852,80	2,3294	1,1530	848,10	853,90	2,3255
220	1,1898	940,70	943,70	2,5174	1,1866	938,40	944,40	2,5128
Sat.	1,1973	959,10	962,10	2,5546	1,2959	1147,8	1154,2	2,9202
P = 7500 kPa; T <sub>sat</sub> = 290,9 °C					P = 10000 kPa; T <sub>sat</sub> = 311,06°C			
20	0,9984	83,50	90,99	0,2950	0,9972	83,36	93,33	0,2945
40	1,0045	166,64	174,18	0,5696	1,0034	166,35	176,38	0,5686
80	1,0256	333,15	340,84	1,0704	1,0245	332,59	342,83	1,0688
100	1,0397	416,91	424,62	1,3011	1,0385	416,12	426,50	1,2992
140	1,0752	585,72	593,78	1,7317	1,0737	584,68	595,42	1,7292
180	1,1219	759,13	766,55	2,1308	1,1199	756,65	767,84	2,1275
220	1,1835	936,20	945,10	2,5083	1,1805	934,10	945,90	2,5039
260	1,2696	1124,4	1134,0	2,8763	1,2645	1121,1	1133,7	2,8699
Sat.	1,3677	1282,0	1292,2	3,1649	1,4524	1393,0	1407,6	3,3596



## 3.5. Tablas de propiedades



### 3.5.2 Propiedades del aire como gas ideal

Ecuaciones de partida

- Ley de Gases Ideales

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad [3.15]$$

- Proceso Adiabático

Proceso adiabático + reversible = isoentrópico

$$P \cdot V^\gamma = cte \quad [3.16]$$

Siendo

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad [3.17]$$



## 3.5. Tablas de propiedades



### 3.5.2 Propiedades del aire como gas ideal

Ecuaciones de partida



**Entalpía**  $h(T) = \int_0^T c_p(T) \cdot dT$

**Valores de referencia :**  
 $h = 0$  y  $U = 0$  para  $T = 0K$

**Energía interna**  $u(T) = h - pv = h - RT$

**Entropía estándar ( $s^0$ ):**  $s$  específica a la temperatura dada ( $T$ ) y  $P = 1atm$

**Variación de entropía en una transformación**

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



## 3.5.2 Propiedades del aire como gas ideal

Ecuaciones de partida



**Transformación isoentrópica**

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

**Presión relativa ( $p_r$ )**

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\exp[s^0(T_2)/R]}{\exp[s^0(T_1)/R]} = \frac{p_r(T_2)}{p_r(T_1)}$$

Compresión o expansión ( $s_1 = s_2$ )  $\Rightarrow p_2 = p_1 \frac{p_r(T_2)}{p_r(T_1)}$

Ley de gases ideales  $\Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \left( \frac{R \cdot T_2}{p_2} \right) \cdot \left( \frac{p_1}{R \cdot T_1} \right)$

**Volumen relativo ( $v_r$ )**

$$\frac{v_2}{v_1} = \left( \frac{R \cdot T_2}{p_r(T_2)} \right) \left( \frac{p_r(T_1)}{R \cdot T_1} \right) = \frac{v_r(T_2)}{v_r(T_1)}$$



## 3.5.2 Propiedades del aire como gas ideal

Tabla C-1: Propiedades del aire como gas ideal

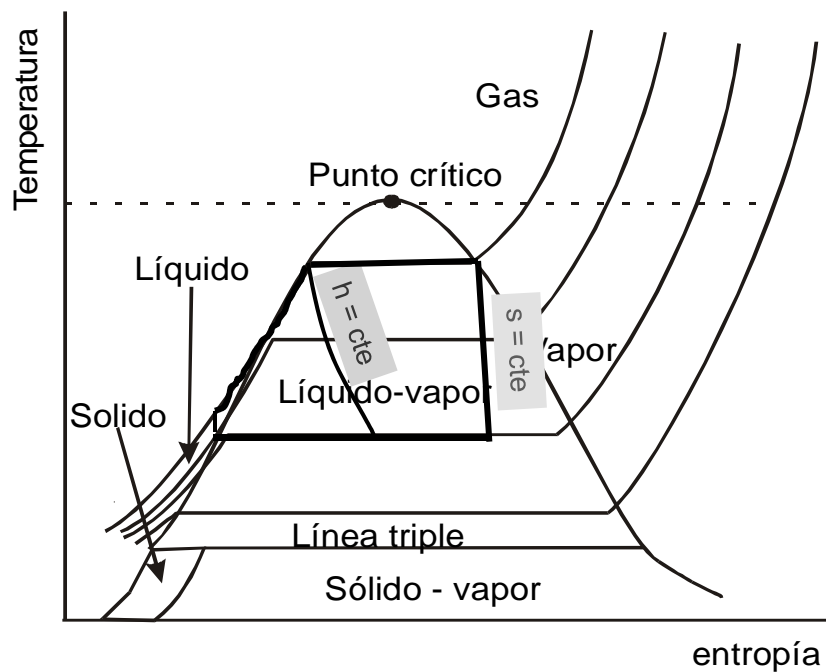
$h, h_f$  y  $u$  (kJ/kg),  $s$  (kJ/kgK)

$h$	$p_r$	$u$	$v_r$	$s^0$	$T$	$h$	$p_r$	$u$	$v_r$	$s^0$
199,97	0,3363	142,56	1707,0	1,29559	550	554,74	11,86	396,86	133,1	2,31809
209,97	0,3987	149,69	1512,0	1,34444	560	565,17	12,66	404,42	127,0	2,33685
219,97	0,4690	156,82	1346,0	1,39105	570	575,59	13,50	411,97	121,2	2,35531
230,02	0,5477	164,00	1205,0	1,43557	580	586,04	14,38	419,55	115,7	2,37348
240,02	0,6355	171,13	1084,0	1,47824	590	596,52	15,31	427,15	110,6	2,39140
250,05	0,7329	178,28	979,0	1,51917	600	607,02	16,28	434,78	105,8	2,40902
260,09	0,8405	185,45	887,8	1,55848	610	617,53	17,30	442,42	101,2	2,42644
270,11	0,9590	192,60	808,0	1,59634	620	628,07	18,36	450,09	96,92	2,44356
280,13	1,0889	199,75	738,0	1,63279	630	638,63	19,44	457,78	92,84	2,46048
285,14	1,1584	203,33	706,1	1,65055	640	649,22	20,64	465,50	88,99	2,47716
290,16	1,2311	206,91	676,1	1,66802	650	659,84	21,86	473,25	85,34	2,49364
295,17	1,3068	210,49	647,9	1,68515	660	670,47	23,13	481,01	81,89	2,50985
300,19	1,3860	214,07	621,2	1,70203	670	681,14	24,46	488,81	78,61	2,52589
305,22	1,4686	217,67	596,0	1,71865	680	691,82	25,85	496,62	75,50	2,54175
310,24	1,5546	221,25	572,3	1,73498	690	702,52	27,29	504,45	72,56	2,55731
315,27	1,6442	224,85	549,8	1,75106	700	713,27	28,80	512,33	69,76	2,57277
320,29	1,7375	228,42	528,6	1,76690	710	724,04	30,38	520,23	67,07	2,58810
325,31	1,8345	232,02	508,4	1,78249	720	734,82	32,02	528,14	64,53	2,60319
330,34	1,9352	235,61	489,4	1,79783	730	745,62	33,72	536,07	62,13	2,61803
340,42	2,1490	242,82	454,1	1,82790	740	756,44	35,50	544,02	59,82	2,63280
350,49	2,379	250,02	422,2	1,85708	750	767,29	37,35	551,99	57,63	2,64737
360,58	2,626	257,24	393,4	1,88543	760	778,18	39,27	560,01	55,54	2,66176
370,67	2,892	264,46	367,2	1,91313	770	789,11	41,31	568,07	53,39	2,67595
380,77	3,176	271,69	343,4	1,94001	780	800,03	43,35	576,12	51,64	2,69013
390,88	3,481	278,93	321,5	1,96633	790	810,99	45,55	584,21	49,86	2,70400





- 3.1. Fases de una sustancia pura
- 3.2. Superficies y diagramas de fase
- 3.3. Ecuaciones de estado para gases
- 3.4. Determinación de propiedades mediante ecuaciones
- 3.5. Tablas de propiedades
- 3.6. Transformaciones habituales





---

1.- Termodinámica. Y. A. Cengel y M. A. Boles. Editorial McGraw-Hill, Mexico, 2000-2001.

2.- Fundamentos de termodinámica técnica. M. J. Morán y H. N. Shapiro. Editorial Reverté, Barcelona, 1998-1999.

3.- Termotecnia básica para ingenieros químicos. A. de Lucas. Ediciones de la Universidad de Castilla La Mancha, 2004-2007