



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

PROPIEDADES DE LAS SUSTANCIAS SIMPLES COMPRESIBLES

Apellidos y nombre: Velázquez Martí, Borja (borvemar@dmta.upv.es)¹

Departamento/Centro: ¹Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria
Universitat Politècnica de València

Índice general

1. Resumen de las ideas clave	2
2. Introducción	2
3. Objetivos	3
4. Diagrama T-S	3
5. Diagrama P-h	6
6. Cálculo de las propiedades termodinámicas en la zona de transición	7
7. Cierre	9
8. Ejercicios propuestos	10
9. Bibliografía	10

1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se analiza cómo se producen los cambios de estado en sustancias simples compresibles, y la modificación de las variables termodinámicas: volumen específico, energía interna, entalpía específica y entropía específica. Cada estado del sistema puede ser representado en el diagrama T-S (temperatura - entropía). Este diagrama define tres áreas: una formada por todos los puntos en los que el sistema está en estado líquido (llamada *zona de líquido subenfriado*); otra zona formada por los puntos en los que el sistema está en estado vapor (llamada *zona de vapor sobrecalentado*); y otra zona en la que se produce una transición, es decir, un cambio de fase, existiendo una mezcla de líquido y vapor. A los puntos de la frontera entre la zona de líquido subenfriado y la zona de transición se denominan puntos de *líquido saturado*. A los puntos de la frontera entre la zona de transición (*zona cambio de fase*) y zona de vapor sobrecalentado se denominan puntos de *vapor saturado*. Las variables termodinámicas de los puntos de las zonas de líquido subenfriado y vapor sobrecalentado, así como, los puntos de saturación se pueden encontrar en tablas disponibles en distinta bibliografía. Las variables termodinámicas de los puntos de la zona de transición se pueden calcular a partir del conocimiento de la fracción de vapor y de líquido que existe en la mezcla. A la relación entre la masa de vapor y la masa total se denomina *título de la mezcla*. Cualquier variable termodinámica en la zona de transición se calcula multiplicando el título por el valor de la variable en el punto de vapor saturado a la misma presión y temperatura, más la fracción de líquido multiplicada por el valor de la variable en el punto de líquido saturado a esa misma presión y temperatura.

2 Introducción

Durante el calentamiento o enfriamiento de las sustancias simples compresibles se produce una modificación de sus variables de estado, pudiéndose producir cambios de estado. El cálculo de estas variables nos permiten, por un lado, fijar los requerimientos para el control de procesos termodinámicos, y por otro, realizar balances de masa y energía.

Se define *sistema* como la parte del universo objeto de estudio. El sistema puede estar constituido por un espacio, unas partículas, un ente material. Los parámetros que definen el estado de un sistema se definen como *variables de Estado*. Son variables de Estado termodinámicas las siguientes:

- *Temperatura*, es una manifestación del nivel energético vibracional de las partículas que constituyen la materia (T , K).
- *Presión*, fuerza ejercida por la unidad de superficie que contiene el sistema (P , Pa).
- *Masa*, cantidad de materia que posee el sistema (m , kg).
- *Volumen específico*, espacio que ocupa el sistema por unidad de masa (v , m^3/kg).
- *Energía interna específica*, esta cantidad de energía contenida en un determinado instante en el sistema por unidad de masa (u , kJ/kg).
- *Entalpía específica*, es una variable de estado derivada fruto de la suma de la energía interna específica más el producto de la presión por el volumen específico del sistema ($h = u + Pv$, kJ/kg).
- *Entropía específica*, magnitud termodinámica que indica el grado de desorden molecular de un sistema por unidad de masa (s , kJ/kg K).

3 Objetivos

Una vez que el alumno se lea con detenimiento este documento, será capaz de:

1. Describir el proceso de calentamiento o enfriamiento de una sustancia simple compresible.
2. Conociendo la temperatura y presión de una sustancia simple compresible, determinar si está en estado líquido, vapor, o está experimentando un cambio de estado, manejando gráficas y tablas de las propiedades termodinámicas de la sustancia en cuestión.
3. Determinar a partir de la temperatura y presión de una sustancia simple compresible (como el agua) los valores de volumen específico, energía interna, entalpía específica y entropía específica, manejando tablas de propiedades termodinámicas.

4 Diagrama T-S

En el diagrama temperatura-entropía (T-S) se representa un área en la que cada punto define un estado distinto del sistema objeto de estudio. Es decir, en cada punto del diagrama el sistema posee alguna de las variables termodinámicas diferente.

Para entender la construcción de este diagrama vamos a suponer el siguiente experimento. Si colocamos una olla de agua a calentar, evidentemente aumentará su temperatura. Si la olla está destapada el agua de su interior se encuentra a presión atmosférica y la temperatura del agua aumentará hasta que comience el proceso de evaporación, momento en el que la temperatura permanecerá constante. Sólo cuando toda el agua haya cambiado de estado y se encuentre en forma de vapor volverá a aumentar la temperatura.

Si repetimos el experimento de calentamiento del agua en la olla, pero en esta ocasión la olla está cerrada mediante una tapadera, el proceso de calentamiento será más rápido puesto que la presión en el interior es superior a la atmosférica. Se observa también que la temperatura a la cual empieza la ebullición es más alta, y que la energía necesaria para conseguir el cambio de estado es menor.

Por otro lado, si repetimos el experimento del calentamiento del agua en la olla, pero en esta ocasión dejamos la olla destapada y se activa un extractor de vapor encima de la misma, la presión a la que está sometida el agua se puede suponer inferior a la atmosférica. Entonces, se observa la velocidad con la que aumenta la temperatura es más lenta, el cambio de estado se produce a temperatura inferior a la que se produjo a presión atmosférica, y el calor absorbido durante el cambio de estado es mayor.

Al representar el aumento de la temperatura a distintas presiones en el diagrama T-S (Figura 1), se observa que las curvas pueden dividirse en 3 tramos: un primer tramo cuando el sistema está en estado líquido y la temperatura es creciente; otro tramo cuando el sistema tiene temperatura constante, momento en el que está cambiando de estado; y por último, un tercer tramo donde vuelve a aumentar la temperatura, estando el sistema en fase de vapor.

Por tanto, el diagrama se divide en tres áreas: una formada por todos los puntos en los que el sistema está en estado líquido (llamada *zona de líquido subenfriado*); otra zona formada por los puntos en los que el sistema está en estado vapor (llamada *zona de vapor sobrecalentado*); y otra zona en la que se produce una transición, es decir un cambio de fase, existiendo una mezcla de líquido y vapor. A los puntos de la frontera entre las zonas líquido subenfriado y zona de transición se denominan puntos de *líquido saturado*. A los puntos de la frontera entre las zonas transición (*zona cambio de fase*) y zona de vapor sobrecalentado se denominan puntos de *vapor saturado*. Las variables termodinámicas de los puntos de las zonas de líquido

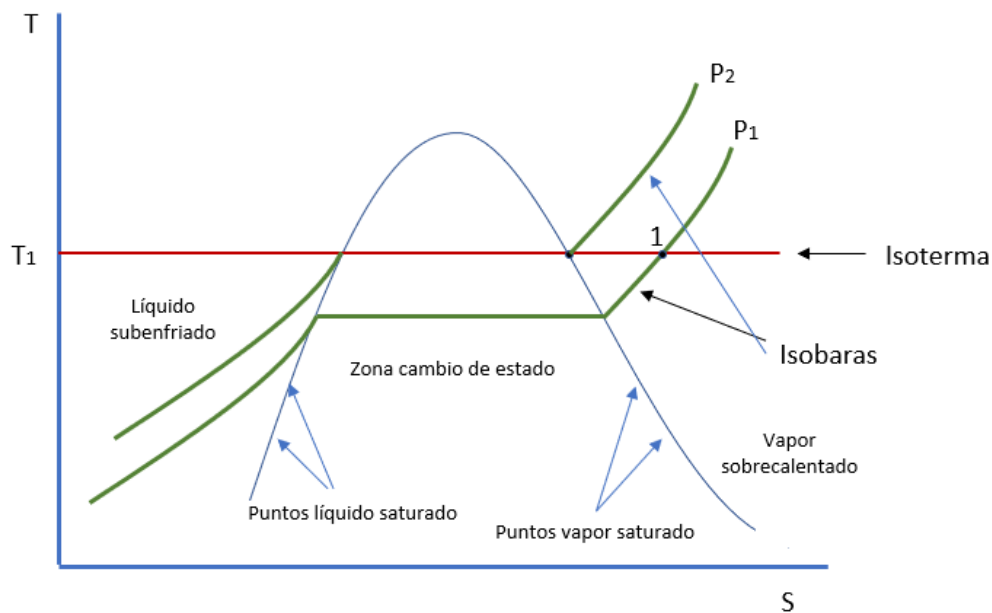


Figura 1: Diagrama T-S

subenfriado y vapor sobrecalentado, así como, los puntos de saturación se pueden encontrar en tablas disponibles en distinta bibliografía.

Las variables termodinámicas de los puntos de la zona de transición se pueden calcular conociendo la fracción de vapor y de líquido que existe en la mezcla.

A continuación se pueden encontrar ejemplos de tablas de propiedades termodinámicas del agua. Tablas de la propiedades del agua y distintas sustancias están disponibles en el siguiente enlace: [Tablas](#)

Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de temperaturas

Temp, °C	Presión bar	Volumen específico m ³ / kg		Energía interna kJ / kg		Entalpía kJ / kg			Entropía kJ / kg , K	
		Líquido sat,	Vapor sat,	Líquido sat,	Vapor sat,	Líquido sat,	Vapor, vaporiz.,	Vapor sat,	Líquido sat,	Vapor sat,
		$v_f \times 10^{-3}$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
.01	0,00611	1,0002	206,136	0,00	2375,3	0,01	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562
4	0,00813	1,0001	157,232	16,77	2380,9	16,78	2491,9	2508,7	0,0610	9,0514
5	0,00872	1,0001	147,120	20,97	2382,3	20,98	2489,6	2510,6	0,0761	9,0257
6	0,00935	1,0001	137,734	25,19	2383,6	25,20	2487,2	2512,4	0,0912	9,0003
8	0,01072	1,0002	120,917	33,59	2386,4	33,60	2482,5	2516,1	0,1212	8,9501
10	0,01228	1,0004	106,379	42,00	2389,2	42,01	2477,7	2519,8	0,1510	8,9008
11	0,01312	1,0004	99,857	46,20	2390,5	46,20	2475,4	2521,6	0,1658	8,8765
12	0,01402	1,0005	93,784	50,41	2391,9	50,41	2473,0	2523,4	0,1806	8,8524
13	0,01497	1,0007	88,124	54,60	2393,3	54,60	2470,7	2525,3	0,1953	8,8285
14	0,01598	1,0008	82,848	58,79	2394,7	58,80	2468,3	2527,1	0,2099	8,8048
15	0,01705	1,0009	77,926	62,99	2396,1	62,99	2465,9	2528,9	0,2245	8,7814
16	0,01818	1,0011	73,333	67,18	2397,4	67,19	2463,6	2530,8	0,2390	8,7582
17	0,01938	1,0012	69,044	71,38	2398,8	71,38	2461,2	2532,6	0,2535	8,7351
18	0,02064	1,0014	65,038	75,57	2400,2	75,58	2458,8	2534,4	0,2679	8,7123
19	0,02198	1,0016	61,293	79,76	2401,6	79,77	2456,5	2536,2	0,2823	8,6897
20	0,02339	1,0018	57,791	83,95	2402,9	83,96	2454,1	2538,1	0,2966	8,6672
21	0,02487	1,0020	54,514	88,14	2404,3	88,14	2451,8	2539,9	0,3109	8,6450
22	0,02645	1,0022	51,447	92,32	2405,7	92,33	2449,4	2541,7	0,3251	8,6229
23	0,02810	1,0024	48,574	96,51	2407,0	96,52	2447,0	2543,5	0,3393	8,6011
24	0,02985	1,0027	45,883	100,70	2408,4	100,70	2444,7	2545,4	0,3534	8,5794
25	0,03169	1,0029	43,360	104,88	2409,8	104,89	2442,3	2547,2	0,3674	8,5580

Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de presiones

Presión bar	Temp. °C	Volumen específico m ³ / kg		Energía interna kJ / kg		Entalpia kJ / kg			Entropía kJ / kg, K	
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor vaporiz.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.
		$v_f \times 10^{-4}$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
0,04	28,96	1,0040	34,800	121,45	2415,2	121,46	2432,9	2554,4	0,4226	8,4746
0,06	36,16	1,0064	23,739	151,53	2425,0	151,53	2415,9	2567,4	0,5210	8,3304
0,08	41,51	1,0084	18,103	173,87	2432,2	173,88	2403,1	2577,0	0,5926	8,2287
0,10	45,81	1,0102	14,674	191,82	2437,9	191,83	2392,8	2584,7	0,6493	8,1502
0,20	60,06	1,0172	7,649	251,38	2456,7	251,40	2358,3	2609,7	0,8320	7,9085
0,30	69,10	1,0223	5,229	289,20	2468,4	289,23	2336,1	2625,3	0,9439	7,7686
0,40	75,87	1,0265	3,993	317,53	2477,0	317,58	2319,2	2636,8	1,0259	7,6700
0,50	81,33	1,0300	3,240	340,44	2483,9	340,49	2305,4	2645,9	1,0910	7,5939
0,60	85,94	1,0331	2,732	359,79	2489,6	359,86	2293,6	2653,5	1,1453	7,5320
0,70	89,95	1,0360	2,365	376,63	2494,5	376,70	2283,3	2660,0	1,1919	7,4797
0,80	93,50	1,0380	2,087	391,58	2498,8	391,66	2274,1	2665,8	1,2329	7,4346
0,90	96,71	1,0410	1,869	405,06	2502,6	405,15	2265,7	2670,9	1,2695	7,3949
1,00	99,63	1,0432	1,694	417,36	2506,1	417,46	2258,0	2675,5	1,3026	7,3594
1,50	111,4	1,0528	1,159	466,94	2519,7	467,11	2226,5	2693,6	1,4336	7,2233
2,00	120,2	1,0605	0,8857	504,49	2529,5	504,70	2201,9	2706,7	1,5301	7,1271
2,50	127,4	1,0672	0,7187	535,10	2537,2	535,37	2181,5	2716,9	1,6072	7,0527
3,00	133,6	1,0732	0,6058	561,15	2543,6	561,47	2163,8	2725,3	1,6718	6,9919
3,50	138,9	1,0786	0,5243	583,95	2546,9	584,33	2148,1	2732,4	1,7275	6,9405

Propiedades termodinámicas del agua en vapor sobrecalentado

T °C	v m ³ /kg	u kJ / kg	h kJ / kg	s kJ / kg K
---------	-------------------------	--------------	--------------	----------------

P = 0,06 bar = 0,006 MPa (T _{sat} = 36,16 °C)				
Sat.	23,739	2425,0	2567,4	8,3304
90	27,132	2487,3	2650,1	8,5804
120	30,219	2544,7	2726,0	8,7840
160	33,302	2602,7	2802,5	8,9693
200	36,383	2661,4	2879,7	9,1398
240	39,462	2721,0	2957,8	9,2982
280	42,540	2781,5	3036,8	9,4464
320	45,618	2843,0	3116,7	9,5859
360	48,696	2905,5	3197,7	9,7180
400	51,774	2969,0	3279,6	9,8435
440	54,851	3033,5	3362,6	9,9633
500	59,467	3132,3	3489,1	10,1336

p = 0,70 bar = 0,07 MPa (T _{sat} = 89,95 °C)				
Sat.	2,365	2494,5	2660,0	7,4797
100	2,434	2509,7	2680,0	7,5341
120	2,571	2539,7	2719,6	7,6375
160	2,841	2599,4	2798,2	7,8279
200	3,108	2659,1	2876,7	8,0012
240	3,374	2719,3	2955,5	8,1611
280	3,640	2780,2	3035,0	8,3162
320	3,905	2842,0	3115,3	8,4504
360	4,170	2904,6	3196,5	8,5828
400	4,434	2968,2	3278,6	8,7086
440	4,698	3032,9	3361,8	8,8286
500	5,095	3131,8	3488,5	8,9991

p = 1,5 bar = 0,15 MPa (T _{sat} = 111,37 °C)				
Sat.	1,159	2519,7	2693,6	7,2233
120	1,188	2533,3	2711,4	7,2693
160	1,317	2595,2	2792,8	7,4665
200	1,444	2656,2	2872,9	7,6433
240	1,570	2717,2	2952,7	7,8052
280	1,695	2778,0	3032,2	7,9555

v m ³ /kg	u kJ / kg	h kJ / kg	s kJ / kg K
-------------------------	--------------	--------------	----------------

p = 0,35 bar = 0,035 MPa (T _{sat} = 72,69 °C)			
4,526	2473,0	2631,4	7,7158
4,625	2483,7	2645,6	7,7564
5,163	2542,4	2723,1	7,9644
5,696	2601,2	2800,6	8,1519
6,228	2660,4	2878,4	8,3237
6,758	2720,3	2956,8	8,4828
7,287	2780,9	3036,0	8,6314
7,815	2842,5	3116,1	8,7712
8,344	2905,1	3197,1	8,9034
8,872	2968,6	3279,2	9,0291
9,400	3033,2	3362,2	9,1490
10,192	3132,1	3488,8	9,3194

p = 1,0 bar = 0,10 MPa (T _{sat} = 99,63 °C)			
1,694	2506,1	2675,5	7,3594
1,696	2506,7	2676,2	7,3614
1,793	2537,3	2716,6	7,4668
1,984	2597,8	2796,2	7,6597
2,172	2658,1	2875,3	7,8343
2,359	2718,5	2954,5	7,9949
2,546	2779,6	3034,2	8,1445
2,732	2841,5	3114,6	8,2849
2,917	2904,2	3195,9	8,4175
3,103	2967,9	3278,2	8,5435
3,288	3032,6	3361,4	8,6636
3,565	3131,6	3488,1	8,8342

p = 3,0 bar = 0,30 MPa (T _{sat} = 133,55 °C)			
0,606	2543,6	2725,3	6,9919
0,651	2587,1	2782,3	7,1276
0,716	2650,7	2865,5	7,3115
0,781	2713,1	2947,3	7,4774
0,844	2775,4	3028,6	7,6260

Propiedades del agua, líquido subenfriado

$P = 25 \text{ bar} = 2,5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 233,99^\circ\text{C}$)				
20	1,0006	83,80	86,30	,2961
40	1,0067	167,25	169,77	,5715
80	1,0280	334,29	336,86	1,0737
100	1,0423	418,24	420,85	1,3050
140	1,0784	587,82	590,52	1,7369
180	1,1261	761,16	763,97	2,1375
200	1,1555	849,9	852,8	2,3294
220	1,1898	940,7	943,7	2,5174
Sat	1,1973	959,1	962,1	2,5546

$p = 50 \text{ bar} = 5,0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 263,99^\circ\text{C}$)				
,9995	83,65	88,65	,2956	
1,0056	166,95	171,97	,5705	
1,0268	333,72	338,85	1,0720	
1,0410	417,52	422,72	1,3030	
1,0768	586,76	592,15	1,7343	
1,1240	759,63	765,25	2,1341	
1,1530	848,1	853,9	2,3255	
1,1866	938,4	944,4	2,5128	
1,2859	1147,8	1154,2	2,9202	

$p = 75 \text{ bar} = 7,5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 290,59^\circ\text{C}$)				
20	,9984	83,50	90,99	,2950
40	1,0045	166,64	174,18	,5696
80	1,0256	333,15	340,84	1,0704
100	1,0397	416,81	424,62	1,3011
140	1,0752	585,72	593,78	1,7317
180	1,1219	758,13	766,55	2,1308
220	1,1835	936,2	945,1	2,5083
260	1,2696	1124,4	1134,0	2,8763
Sato	1,3677	1282,0	1292,2	3,1649

$p = 100 \text{ bar} = 10,0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 311,06^\circ\text{C}$)				
,9972	83,36	93,33	,2945	
1,0034	166,35	176,38	,5686	
1,0245	332,59	342,83	1,0688	
1,0385	416,12	426,50	1,2992	
1,0737	584,68	595,42	1,7292	
1,1199	756,65	767,84	2,1275	
1,1805	934,1	945,9	2,5039	
1,2645	1121,1	1133,7	2,8699	
1,4524	1393,0	1407,6	3,3596	

5 Diagrama P-h

Otra forma de representar los estados de un sistema termodinámico es mediante el diagrama presión-entalpía (P-h). Al igual que el T-S el área se divide en las zonas: zona de líquido subenfriado, zona de transición y zona de vapor sobrecalentado. En este diagrama P-h las isotermas en la zona de líquido subenfriado son prácticamente verticales. Las isobaras son horizontales en la zona de líquido subenfriado y en la zona de vapor sobrecalentado, pero en la zona de transición coinciden con las isotermas. En la zona de vapor sobrecalentado las isotermas decrecen de forma más o menos parabólica.

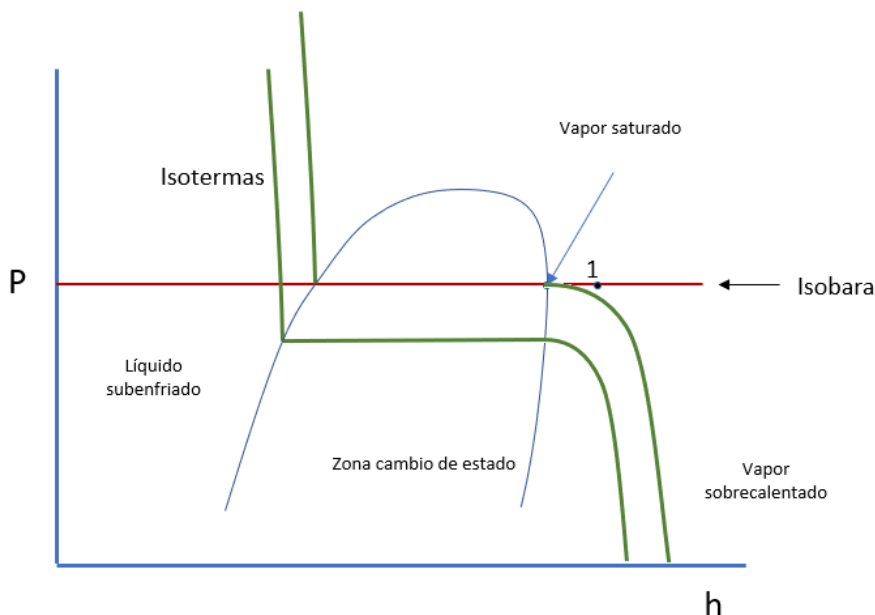


Figura 2: Diagrama presión-entalpía (P-h)

6 Cálculo de las propiedades termodinámicas en la zona de transición

Se define como *título de una mezcla líquido-vapor* a la relación entre la masa de vapor (m_{vapor}) respecto a la masa total de la mezcla (m). Se representa con la letra x

$$x = \frac{m_{vapor}}{m} \quad (1)$$

Conocido el título de una mezcla, se puede calcular cualquier variable termodinámica a partir de los valores de esas variables en los estados de líquido y vapor saturados a esa misma presión y temperatura. Recuérdese que todos los puntos de la isoterma en la zona de transición tienen la misma presión.

Con la ecuación (2) se calcula el volumen específico de una mezcla líquido-vapor con el título x (v_x), donde $v_{vapor\ sat}$ es el volumen específico del vapor saturado, y $v_{liq\ sat}$ es el volumen específico del líquido saturado, para una temperatura y presión determinada.

$$v_x = x \cdot v_{vapor\ sat} + (1 - x) \cdot v_{liq\ sat} \quad (2)$$

Con la ecuación (3) se calcula la energía interna específica de una mezcla líquido-vapor con el título x (u_x), donde $u_{vapor\ sat}$ es la energía interna específica del vapor saturado, y $u_{liq\ sat}$ es la energía interna específica del líquido saturado, para una temperatura y presión determinada.

$$u_x = x \cdot u_{vapor\ sat} + (1 - x) \cdot u_{liq\ sat} \quad (3)$$

Con la ecuación (4) se calcula la entalpía específica de una mezcla líquido-vapor con el título x (h_x), donde $h_{vapor\ sat}$ es la entalpía específica del vapor saturado, y $h_{liq\ sat}$ es la entalpía específica del líquido saturado, para una temperatura y presión determinada.

$$h_x = x \cdot h_{vapor\ sat} + (1 - x) \cdot h_{liq\ sat} \quad (4)$$

Con la ecuación (5) se calcula la entropía específica de una mezcla líquido-vapor con el título x (s_x), donde $s_{vapor\ sat}$ es la entropía específica del vapor saturado, y $s_{liq\ sat}$ es la entropía específica del líquido saturado, para una temperatura y presión determinada.

$$s_x = x \cdot s_{vapor\ sat} + (1 - x) \cdot s_{liq\ sat} \quad (5)$$

Ejemplo 1

Determina la fase o fases en un sistema constituido por H₂O en las condiciones siguientes. Indica el valor de sus variables de estado: volumen específico, energía interna específica, entalpía específica, entropía específica .

- a) $p = 500 \text{ kPa}$, $T = 200^\circ\text{C}$
- b) $p = 5 \text{ MPa}$, $T = 264^\circ\text{C}$, $x = 0,6$
- c) $p = 20 \text{ MPa}$, $T = 180^\circ\text{C}$

Resolución

- a) Se puede ver en la tabla que la temperatura de saturación del agua a 500 kPa (5 bar) es 151,9°C. Como la temperatura es superior (200°C), el agua se encuentra en estado vapor sobrecalentado.

Presión bar	Temp. °C	Volumen específico m ³ /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg, K	
		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Vaporiz.	Líquido	Vapor
		sat,	sat,	sat,	sat,	sat,	vaporiz,	sat,	sat,	sat,
0,04	28,96	1,0040	34,800	121,45	2415,2	121,46	2432,9	2554,4	0,4226	8,4746
4,50	147,9	1,0882	0,4140	622,25	2557,6	623,25	2120,7	2743,9	1,8207	6,8565
5,00	151,9	1,0926	0,3749	639,68	2561,2	640,23	2108,5	2748,7	1,8607	6,8212
6,00	158,9	1,1006	0,3157	669,90	2567,4	670,56	2086,3	2756,8	1,9312	6,7600

En la tabla de vapor sobrecalentado se pueden consultar los valores de volumen específico 0,4249 m³/kg, energía interna específica = 2642,9 kJ/kg, entalpía específica = 2855,4 kJ/kg, entropía específica = 7,0592 kJ/kg K .

	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
P = 5,0 bar = 0,50 MPa (T _{sat} = 151,86 °C)				
Sat	0,3749	2561,2	2748,7	6,8213
180	0,4045	2609,7	2812,0	6,9656
200	0,4249	2642,9	2855,4	7,0592
240	0,4646	2707,6	2939,9	7,2307
280	0,5034	2771,2	3022,9	7,3865
320	0,5416	2834,7	3105,6	7,5308
360	0,5796	2898,7	3188,4	7,6660
400	0,6173	2963,2	3271,9	7,7938
440	0,6548	3028,6	3356,0	7,9152
500	0,7109	3128,4	3483,9	8,0873
600	0,8041	3299,6	3701,7	8,3522
700	0,8969	3477,5	3925,9	8,5952

b) Se puede ver en la tabla que la temperatura de saturación del agua a 5 MPa (50 bar) es exactamente 264°C. Por tanto, el agua está en proceso de cambio de estado.

Presión bar	Temp. °C	Volumen específico m ³ /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg, K	
		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Vaporiz.	Líquido	Vapor
		sat,	sat,	sat,	sat,	sat,	vaporiz,	sat,	sat,	sat,
45,0	257,5	1,2692	0,04406	1116,2	2600,1	1121,9	1676,4	2798,3	2,8610	6,0199
50,0	264,0	1,2859	0,03944	1147,8	2597,1	1154,2	1640,1	2794,3	2,9202	5,9734
60,0	275,6	1,3187	0,03244	1205,4	2589,7	1213,4	1571,0	2784,3	3,0267	5,8892

Dado que el estado del sistema se encuentra en la zona de transición, para determinar las variables debería conocerse el título.

$$v_{180} = x \cdot 0,03944 + (1 - x) \cdot 1,2859 \cdot 10^{-3} = 0,024 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_{180} = x \cdot 2597,1 + (1 - x) \cdot 1147,8 = 2017,38 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{180} = x \cdot 2794,3 + (1 - x) \cdot 1154,2 = 2138,26 \text{ kJ/kg}$$

$$s_{180} = x \cdot 5,9734 + (1 - x) \cdot 2,9202 = 4,75 \text{ kJ/kg K}$$

c) Se puede ver en la tabla que la temperatura de saturación a 20 MPa (200 bar), 365,8°C. Como el agua está a una temperatura de 180°C, menor a la de saturación, se encuentra en estado líquido.

Presión bar	Temp. °C	Volumen específico m ³ /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg, K	
		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Vaporiz.	Líquido	Vapor
		sat,	sat,	sat,	sat,	sat,	vaporiz,	sat,	sat,	sat,
180	357,1	1,8397	0,007489	1698,9	2374,3	1732,0	777,1	2509,1	3,8715	5,1044
190	361,5	1,9243	0,006657	1739,9	2338,1	1776,5	688,0	2464,5	3,9388	5,0228
200	365,8	2,036	0,005834	1785,6	2293,0	1826,3	583,4	2409,7	4,0139	4,9269
220,9	374,1	3,155	0,003155	2029,6	2029,6	2099,3	0	2099,3	4,4298	4,4298

En la tabla de líquido subenfriado se pueden consultar los valores de volumen específico 1,1120 m³/kg, energía interna específica = 750,95 kJ/kg, entalpía específica = 773,20 kJ/kg, entropía específica = 2,1147 kJ/kg K .

	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
$p = 200 \text{ bar} = 20,0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 365,81 \text{ }^\circ\text{C}$)				
20	,9928	82,77	102,62	,2923
40	,9992	165,17	185,16	,5646
80	1,0199	330,40	350,80	1,0624
100	1,0337	413,39	434,06	1,2917
140	1,0678	580,69	602,04	1,7193
180	1,1120	750,95	773,20	2,1147
220	1,1693	925,9	949,3	2,4870
260	1,2462	1108,6	1133,5	2,8459
300	1,3596	1306,1	1333,3	3,2071
Sato	2,036	1785,6	1826,3	4,0139

7 Cierre

La determinación de las variables termodinámicas en sustancias simples compresibles se realiza inicialmente mediante la medición de la presión y temperatura del sistema. Si para la temperatura considerada, la presión del sistema es superior a la presión de saturación a dicha temperatura, la sustancia está en estado líquido subenfriado; por otra parte, si la presión del sistema es inferior a la presión de saturación a dicha temperatura, la sustancia está en estado vapor sobrecalentado. Si la presión es exactamente igual a la presión de saturación, el sistema se encuentra en transición, cambiando su estado, estando formado por una mezcla de líquido y vapor. Por otro lado, para una presión considerada, si la temperatura del sistema es inferior a la temperatura de saturación a esa presión, el sistema se encuentra en un estado de líquido subenfriado; si la temperatura del sistema es superior a la temperatura de saturación a esa presión, nos encontramos ante un sistema en estado vapor sobrecalentado. Si la temperatura del sistema es exactamente igual a la temperatura de saturación, éste se encuentra cambiando de estado.

En los estados del líquido subenfriado, puntos de saturación, y vapor sobrecalentado las propiedades termodinámicas tales como el volumen específico, energía interna específica, entalpía específica y entropía específica se pueden encontrar en tablas. Estas variables de estado en los puntos correspondientes a la zona de transición se determinan mediante el cálculo del título, mediante una media ponderada de las propiedades de vapor y líquido saturado a la presión y temperatura correspondiente.

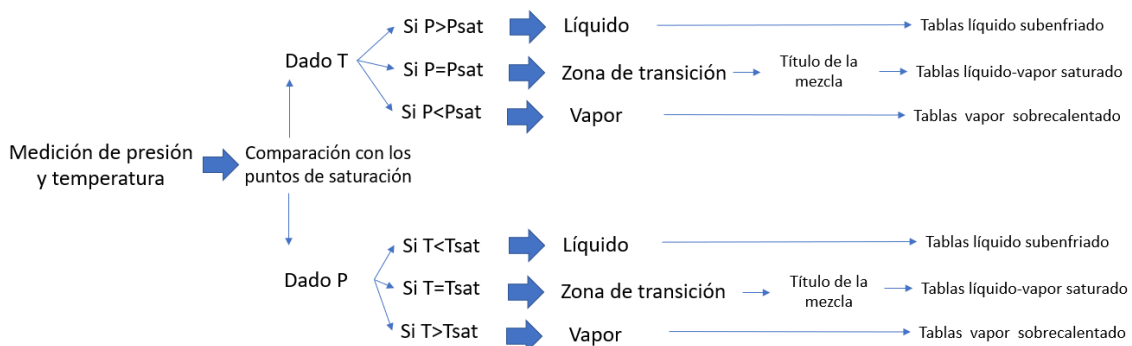


Figura 3: Determinación de propiedades termodinámicas en sustancias simples compresibles mediante tablas

8 Ejercicios propuestos

Ejercicio 1

Determina el título de una mezcla bifásica líquido-vapor constituida por H₂O a 200°C con un volumen específico de 0,1 m³/kg.

Ejercicio 2

El volumen específico del líquido saturado de nitrógeno a 100 K es $1,452 \cdot 10^{-3}$ m³/kg y el del vapor saturado de nitrógeno a la misma temperatura es de $31,31 \cdot 10^{-3}$ m³/kg. Determina el de 22 kg de una mezcla bifásica líquido-vapor de nitrógeno a 100 K en un tanque cuyo volumen es 0,5 m³.

Ejercicio 3

Determina el volumen, en m³, ocupado por 2 kg de H₂O a 4 MPa y 420 °C.

Ejercicio 4

Una mezcla bifásica líquido-vapor de H₂O tiene una temperatura de 300 °C y un título del 75 %. La mezcla ocupa un volumen de 0,05 m³. Determina las masas de líquido y vapor presentes, en kg.

Ejercicio 5

Cinco kg de vapor de agua saturado están contenidos en un depósito rígido a una presión inicial de 40 bar. La presión del agua cae a 20 bar como consecuencia de la cesión de calor al ambiente. Determina el volumen del tanque, en m³, y el título del estado final.

[Soluciones de los ejercicios propuestos](#)

9 Bibliografía

ATECYR (2010). Fundamentos de climatización: para instaladores e ingenieros recién titulados. Ed. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (Atecyr)

ATECYR (2016). Fundamentos de refrigeración. Ed. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (Atecyr)(Fernández Seara, J. et al.)

Carbó Ballester, J. (2021). Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Ed. Marcombo.

DTIE 3.01, psicrometría (Pinazo Ojer, José Manuel | García Lastra, Arcadio | ATECYR)

Fenton, Donald L. (2010). Fundamentals of refrigeration I-P. Ed. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).