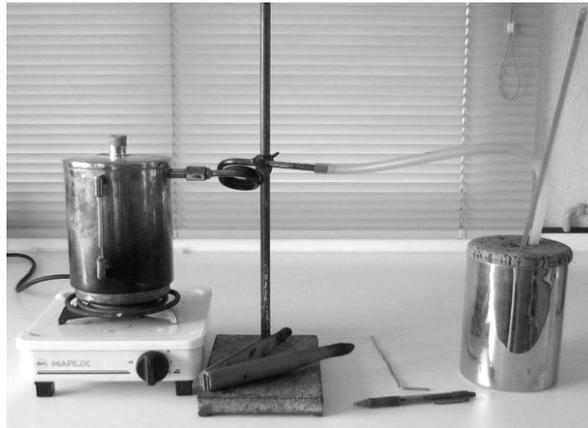

LABORATORIO DE TERMODINÁMICA

PRÁCTICA 1: TÍTULO DE UN VAPOR HÚMEDO



1. OBJETIVOS

Determinar la calidad de un vapor húmedo de agua.

2. MATERIAL

- Calderín para producir el vapor ($P_{\text{atmosférica}} = \text{constante}$)
- Calorímetro adiabático de doble pared
- Termómetro
- Cronómetro

3. INTRODUCCIÓN

La determinación experimental del título o calidad de un vapor es práctica habitual en determinados procesos industriales que utilizan vapor como agente caloportador. Tal es el caso, por ejemplo, de las centrales térmicas de potencia, o los procesos de calefacción. Las calderas son los elementos encargados de generar vapor.

Como agente caloportador, el vapor de agua ofrece indudables ventajas técnicas y económicas: facilidad de obtención, materia prima económica y abundante, incombustible, etc., pero quizás la mayor ventaja radica en que su calor latente de condensación es el mayor que se conoce.

4. FUNDAMENTO TEÓRICO

Proceso isóbaro de calentamiento de un líquido

Cuando se aporta calor a un líquido, que se encuentra contenido en un recipiente cerrado a presión constante, su temperatura aumenta con el consiguiente aumento de su volumen (Figura 1, estado 1). El fluido en dicho estado se denomina líquido subenfriado. Conforme se aporta más calor la temperatura aumenta hasta alcanzar la temperatura de ebullición para dicha presión (Estado 2). Este estado se denomina líquido saturado y cualquier contribución de calor provoca la vaporización y por lo tanto el cambio de fase de líquido a vapor. Mientras dura el cambio de fase, la temperatura y presión no varían y el calor suministrado se invierte en realizar dicho cambio de fase. La única variación observable es un aumento del volumen y una disminución en el nivel del líquido como resultado de la transformación de éste a vapor. Durante esta etapa se tiene una mezcla bifásica en distintas proporciones llamado vapor húmedo (Estado 3). Conforme continúa la transferencia de calor el proceso de evaporación se prolonga hasta evaporarse la última gota de líquido (Estado 4). El vapor en el estado 4 se denomina vapor saturado. Cualquier cantidad de calor que pierda el vapor hará que éste se condense. Se producen dos discontinuidades en la pendiente de la curva que coinciden con el inicio y el final de este cambio de fase.

Una vez completado el proceso de cambio de fase transferir más calor da como resultado un aumento de temperatura y de volumen (Estado 5), es un estado de vapor sobrecalentado.

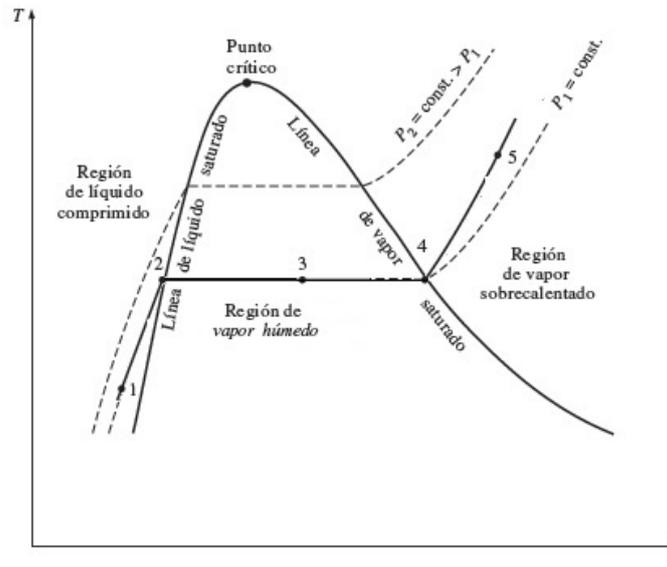


Figura 1. Diagrama T-v para el agua. (Fuente: Çengel-Boles. Termodinámica 7ª Ed.)

A presiones elevadas, se reduce la diferencia entre el volumen del líquido saturado y el del vapor saturado; las dos curvas se unen en el punto crítico. Por encima de la presión crítica, el paso de líquido a vapor se verifica de modo continuo, sin aparición de superficies de separación entre las dos fases. En el caso del agua, las coordenadas críticas son: $P_c = 22,12 \text{ MPa}$ y $T_c = 374,15 \text{ °C}$.

Título de un vapor húmedo

En las regiones bifásicas líquido–vapor se define el **título** o **calidad del vapor (x)** como la fracción de la masa de vapor saturado que hay en la mezcla.

$$x = \frac{m_v}{m_v + m_L} \quad ; \quad 0 < x < 1 \quad (1)$$

m_L = masa de líquido saturado

m_v = masa de vapor saturado

Para medir el título de un vapor se procede a condensarlo en un calorímetro con agua fría. En este proceso de condensación, que se produce a presión constante, se pierde una energía (en forma de calor) que la absorbe el calorímetro y la masa de agua fría.

$$|Q_p| = Q_a \quad (2)$$

Calor perdido = Calor absorbido
 (vapor de agua) (agua fría y calorímetro)

Calor cedido por el vapor de agua

El vapor de agua al condensarse pasa desde el estado inicial (salida del calderín) en forma de vapor húmedo hasta el estado final en forma de líquido subenfriado a la temperatura final T_F (calorímetro).

$$|Q_P| = \Delta H_{\text{vapor añadido}} = (m_V + m_L) (h_{\text{inicial}} - h_{\text{final}}) \quad (3)$$

$$h_{\text{inicial}} = h_x = h' + x(h'' - h')$$

h_x = Entalpía del vapor húmedo

h' = Entalpía específica del líquido saturado (kJ/kg)

h'' = Entalpía específica del vapor saturado (kJ/kg)

$h_{\text{final}} = h_L$ = Entalpía específica del agua en el calorímetro a la temperatura T_F

Calor absorbido en el calorímetro

La temperatura inicial del agua del calorímetro, T_i , irá aumentando a medida que el vapor vaya condensando hasta alcanzar la temperatura final de equilibrio T_F . El calor absorbido se invierte en calentar el agua y el propio calorímetro.

$$Q_a = C_{e\text{-Agua}} (M_A + K) \Delta T \quad ; \quad K = M_c \cdot C_{e\text{-Calorímetro}} \quad (4)$$

M_A = Masa de agua fría

K = Equivalente en agua del calorímetro (g)

M_c = Masa del calorímetro

$C_{e\text{-Calorímetro}}$ = Calor específico del calorímetro

NOTA: El material del calorímetro es de aluminio cuyo calor específico es:

$$C_{e\text{-Al.}} = 0,212 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$$

Aplicando la condición de equilibrio (2) y teniendo en cuenta (3) y (4) se obtiene el título de un vapor húmedo:

$$x = \frac{\frac{C_{e\text{-Agua}} (M_A + K)}{m_V + m_L} \Delta T + (h_L - h')}{(h'' - h')} \quad (5)$$

5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Calentar el calderín para provocar la producción de vapor. Mientras tanto, preparar las condiciones iniciales del agua contenida en el calorímetro; para ello, introducir una masa de agua fría, M_A , a la temperatura inicial T_i . La masa de agua se obtiene por diferencia de pesadas del calorímetro en vacío y lleno de agua:

$$M_A = M_i - M_c$$

M_c = Masa del calorímetro vacío

M_i = Masa del calorímetro lleno de agua a la temperatura T_i

2. Cuando comience la aparición del vapor, conducirlo al calorímetro para que borbotee y vaya condensando al entrar en contacto con la masa de agua fría. El calor cedido por el vapor irá elevando progresivamente la temperatura del agua. Medir esta temperatura cada 30 segundos para controlar el proceso.
3. Continuar el aporte de vapor hasta conseguir que el agua alcance una temperatura final, T_F , tal que su diferencia con la temperatura ambiente sea la misma que la existente entre la temperatura inicial y la ambiente:

$$T_F - T_{ambiente} = T_{ambiente} - T_i$$

Una vez finalizado el aporte de vapor, determinar por diferencia de pesadas, la masa de vapor húmedo añadido, $m_v + m_L$, responsable del calentamiento del agua contenida en el calorímetro:

$$m_v + m_L = M_F - M_i$$

M_F = Masa del calorímetro lleno de agua a la temperatura T_F

4. Mediante las tablas de las propiedades termodinámicas del vapor de agua saturada obtener las entalpías específicas necesarias para calcular el título del vapor.

Es necesario conocer previamente la presión atmosférica, que se puede leer en el barómetro del laboratorio y corregir la lectura mediante las tablas adjuntas.

Para obtener la entalpía específica del agua en estado líquido (h_L) hay que considerar que el calor absorbido durante su calentamiento (proceso a $p = \text{cte}$) corresponde a la variación de entalpías desde el estado de referencia ($h_0 = 0$, $t_0 = 0^\circ\text{C}$) hasta el estado final (h_L T_F):

$$Q_{\text{absorbido}} = M_{\text{agua}} \Delta h = M_{\text{agua}} \cdot (h_L - h_0) = M_{\text{agua}} \cdot c_{\text{agua}} \cdot (T_F - t_0)$$

$$h_L \approx c_{\text{agua}} \cdot T_F$$

6. RESULTADOS

Realizar una tabla con los valores medidos de temperatura y tiempo.

Trazar la gráfica *temperatura – tiempo* e interpretar la curva obtenida

Completar la tabla de resultados

IMPORTANTE: Recuerda efectuar el cálculo de errores asociado a todas las medidas.

TABLA DE RESULTADOS

Temperaturas	Masas
$T_i =$	$M_C =$
$T_F =$	$M_i =$
	$M_A =$
	$M_F =$
	Masa del vapor húmedo añadido $m_v + m_L =$
Condiciones ambientales	Entalpías específicas
Lectura del barómetro:	$h_L =$
Presión corregida:	$h' =$
$T_{\text{ambiente}} =$	$h'' =$
Título del vapor	
$x =$	

LABORATORIO DE TERMODINÁMICA

ANEXO

LAS LECTURAS BAROMÉTRICAS Y SUS CORRECCIONES

Las lecturas en los barómetros de mercurio de cubeta móvil presentan tres errores con sus correspondientes correcciones:

1º CORRECCION POR TEMPERATURA

Las variaciones de temperatura producen variaciones en la densidad del mercurio y dilataciones, por lo que para poder comparar las distintas lecturas se deben corregir a la lectura que marcarían a una misma temperatura.

La temperatura que se toma como patrón es la de cero grados, por lo que esta corrección se denomina también a REDUCCION A CERO.

Existen tablas con factores de corrección para cada temperatura. Multiplicando la lectura de la presión en el barómetro (en mm de Hg.) por el factor correspondiente a la temperatura que indica el termómetro unido se tiene la cantidad a restar a la lectura, para obtener el valor de la presión reducido a cero grados.

En esta página web: <http://www.princoinstruments.com/> hemos hallado la siguiente tabla de factores de corrección (tabla 5 del documento booklet):

T (°C)	Multiplicador	T (°C)	Multiplicador
50	-0,008096	25	-0,00467
48	-0,007775	24	-0,003905
46	-0,007454	23	-0,003743
44	-0,007133	22	-0,003580
42	-0,006811	21	-0,003418
40	-0,006489	20	-0,003256
39	-0,006328	19	-0,003094
38	-0,006167	18	-0,002932
37	-0,006005	17	-0,002769
36	-0,005844	16	-0,002607
35	-0,005683	15	-0,002444
34	-0,005521	14	-0,002282

T (°C)	Multiplicador	T (°C)	Multiplicador
33	-0,005360	13	-0,002119
32	-0,005199	12	-0,001957
31	-0,005037	11	-0,001794
30	-0,004875	10	-0,001631
29	-0,004714	8	-0,001305
28	-0,004552	6	-0,000979
27	-0,004390	4	-0,000653
26	-0,004228	2	-0,000327

Como el barómetro no es necesario que esté al exterior, difícilmente el termómetro unido va a tener temperaturas negativas.

2º CORRECCION INSTRUMENTAL

Al valor de la presión reducido a cero grados es preciso añadir otra corrección debida a errores del propio instrumento, como lo que la capilaridad rebaja en la columna y los errores de graduación de escala y el cero.

Por eso los barómetros oficiales, antes de ponerse en servicio son estudiados por una Oficina Central de cada Servicio Meteorológico, donde se les da un certificado con la corrección instrumental total que deberá sumarse a las alturas barométricas reducidas a cero grados.

3º REDUCCION A LA GRAVEDAD NORMAL

Debido a las variaciones de la intensidad de la gravedad a distintas latitudes geográficas, y para poder comparar las lecturas de dos barómetros situados en lugares diferentes de la Tierra, es preciso reducir todas las columnas barométricas a la altura que tendrían si la aceleración de la gravedad fuese la misma.

Convencionalmente se ha adoptado como valor tipo el correspondiente al nivel del mar y a una latitud de 45°. Estas correcciones suelen, en general, ser menores que las anteriores.

La tabla para correcciones por latitud geográfica es la siguiente. Para latitudes entre 0° y 45° estos valores han de ser restados y para latitudes superiores deben ser sumados:

LATITUD		ALTURAS BAROMÉTRICAS EN MM. REDUCIDAS A CERO GRADOS							
		600	700	720	740	750	760	770	780
0°	90°	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0
5°	85°	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0
10°	80°	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9
15°	75°	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8
20°	70°	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6
25°	65°	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3
30°	60°	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
35°	55°	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
40°	50°	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
45°	45°	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Por último, la tabla para la corrección por altitud, cuyos valores deben restarse a la altura barométrica:

ALTITUD	ALTURAS BAROMÉTRICAS EN MM.				
	400	500	600	700	800
500	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
1000	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
2000	0,0	0,2	0,2	0,3	0,0
3000	0,0	0,3	0,4	0,0	0,0
4000	0,3	0,4	0,5	0,0	0,0
5000	0,4	0,5	0,0	0,0	0,0

Veamos un ejemplo:

Partiendo de los siguientes datos:

- Lectura barómetro: 743,2 mm
- Lectura termómetro unido: 16,3 °C
- Corrección instrumental: + 0,3
- Latitud: 30°
- Altitud: 850 m

1° Corrección por temperatura:

Para 16° el factor que corresponde es $-0,002607$, por lo que el valor de la corrección es igual a: $743,2 \cdot (-0,002607) = -1,94$

Por tanto la altura barométrica reducida a 0°C es $743,2 - 1,94 = 741,26$ mm

2° Corrección instrumental:

Le sumamos la correspondiente a este barómetro: $741,26 + 0,3 = 741,56 \text{ mm}$

3° Corrección por gravedad:

Respecto a la latitud, vemos en la tabla que a 30° y 740 mm corresponde restar 1,0 por tanto: $741,56 - 1,0 = 740,56 \text{ mm}$

Y por último en el cuadro de abajo vemos que para 1000 m de altitud y una altura barométrica de 700 hay que restar 0,1, por lo que nos queda:

$$740,56 - 0,1 = \boxed{740,46 \text{ mm de Hg}}$$

Ese valor sería la presión atmosférica reducida a cero grados, corregido el error instrumental y llevado a la gravedad existente a una latitud de 45° y 0 metros de altitud.

Información extraída del siguiente enlace:

http://www.meteosort.com/meteosort/cas/q_d_2.htm

<http://www.meteored.com/ram/numero4/pdf/tablas.pdf>

MAGNITUDES TERMODINÁMICAS DEL VAPOR DE AGUA SATURADO

PRESIÓN (atm)	TEMP. (°C)	VOL. ESP, (m ³ /kg)	ENTALPÍAS (kcal/kg)		ENERGÍA INTERNA (kcal/kg)		ENTROPÍA (kcal/kg·°C)	
			Agua liq.	Vapor	Agua liq.	Vapor	Agua liq.	Vapor
0,05	32,5	28,7	33	610	33	576	0,113	2,003
0,10	45,4	15,0	45	616	45	581	0,154	1,946
0,20	59,7	7,80	60	622	60	586	0,198	1,889
0,50	80,9	3,30	81	632	81	593	0,260	1,816
0,80	93,0	2,03	93	637	93	597	0,293	1,778
1	99,1	1,73	99	639	99	599	0,310	1,761
2	119,6	0,903	120	647	120	605	0,364	1,706
3	132,9	0,618	133	652	133	608	0,398	1,675
4	142,9	0,472	144	655	144	611	0,423	1,652
5	151,1	0,383	152	657	152	613	0,443	1,634
6	158,1	0,322	159	659	159	614	0,460	1,620
7	164,2	0,279	166	661	166	615	0,474	1,607
8	169,6	0,245	171	662	171	616	0,487	1,596
9	174,5	0,220	177	663	177	617	0,499	1,587
10	179,0	0,199	181	664	181	618	0,509	1,578
12	187,1	0,167	190	666	190	619	0,528	1,563
14	194,1	0,144	197	667	197	620	0,544	1,549
16	200,4	0,126	204	668	204	620	0,558	1,538
18	206,2	0,113	210	668	210	621	0,571	1,527
20	211,4	0,102	216	669	215	621	0,582	1,517
25	222,9	0,082	228	669	228	621	0,607	1,496
30	232,8	0,068	239	669	238	621	0,629	1,478
40	249,2	0,051	257	667	256	619	0,664	1,447
50	262,7	0,040	273	663	271	617	0,692	1,422
60	274,3	0,033	286	660	284	613	0,716	1,399
70	284,5	0,028	298	655	296	610	0,737	1,378
80	293,6	0,024	309	651	306	606	0,756	1,359
90	301,9	0,021	319	646	316	602	0,773	1,341
100	309,5	0,018	329	641	325	598	0,789	1,325
150	340,5	0,011	374	613	368	576	0,862	1,251
200	364,2	0,006	426	573	416	544	0,940	1,172
225	374,0	0,003	501	501	485	485	1,056	1,056