

- *Laboratorio Termodinámica*
-

Práctica 1: Título de un vapor húmedo

Grupo: V17S2M2

- Dan Oliva Martínez
- FernandoCampelo Arribas
- Sergio Ballesteros Muñoz

Introducción

Se entiende por vapor saturado el vapor en contacto con el líquido que lo produce. El estado de un vapor saturado y por consiguiente, sus magnitudes específicas, pueden fijarse con sólo fijar su presión o su temperatura. En un vapor saturado, las magnitudes de estado que nos interesan son: entalpía, energía interna, entropía, calor latente, volumen específico, temperatura y presión.

Basta conocer una de estas magnitudes para inmediatamente saber el valor de las demás.

Fundamento teórico

Calentamos agua a presión constante en un calderín para producir vapor de agua. A los 100°C se empieza a formar el vapor de agua (líquido saturado el inicio de la vaporación y vapor saturado el final). Entre estos dos estados se produce la vaporización: vapor húmedo.

En el intervalo en el que hay dos fases, la temperatura se mantiene constante, por tanto hay dos discontinuidades en la pendiente, que coinciden con el inicio y el final del cambio de fase.

A presiones elevadas, se reduce la diferencia entre el volumen del líquido saturado y el del vapor saturado, las dos curvas se unen en un punto crítico. Por encima de la presión crítica, el paso de líquido a vapor se verifica de modo continuo.

Las bases teóricas serían las siguientes en función de T:

- Entalpía: el Primer principio de la Termodinámica establece para una transformación reversible que:

$$dQ = dU + p \cdot dV$$

- Energía interna:

para el líquido: $U' = H' - J \cdot p \cdot v'$ Kcal/Kg

para el vapor: $U'' = H'' - J \cdot p \cdot v''$ Kcal/Kg

- Entropía:

Es una magnitud de estado relacionada con el intercambio de calor en condiciones reversibles.

- Volumen específico:

Es el volumen en mm³ ocupado por 1 Kg de líquido o de vapor. En el caso de los vapores, su valor puede determinarse, por la ecuación general de los gases.

Destacamos principalmente:

- El título de vapor que es el porcentaje en masa de vapor en una mezcla líquido-vapor y suele denotarse con la letra x:

$$x = \frac{m_v}{m_v + m_l}$$

El valor de x varía desde 0 (líquido saturado) hasta 1 (vapor saturado). Para valores del título cercanos a 1 se tiene una masa de líquido pequeña en forma de gotitas en suspensión. Para valores inferiores el líquido se deposita sobre el fondo del recipiente por efecto de la gravedad. La coexistencia de líquido y vapor se indica normalmente con el término vapor húmedo o mezcla de vapor saturado.

- Calor latente: El calor latente es la energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase, de sólido a líquido (calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización). Se debe tener en cuenta que esta energía en forma de calor se invierte para el cambio de fase y no para un aumento de la temperatura; por tanto al cambiar de gaseoso a líquido y de líquido a sólido se libera la misma cantidad de energía.

Normalmente, una sustancia experimenta un cambio de temperatura cuando absorbe o cede calor al ambiente que le rodea. Sin embargo, cuando una sustancia cambia de fase absorbe o cede calor sin que se produzca un cambio de su temperatura. El calor Q que es necesario aportar para que una masa m de cierta sustancia cambie de fase es igual a

$$Q=mL$$

donde L se denomina calor latente de la sustancia y depende del tipo de cambio de fase.

Esquema de los materiales



Calor específico del agua

El valor del calor específico del agua tiene un mínimo de $0,99795 \text{ cal}/(\text{g}\cdot\text{K})$ para la temperatura de $34,5 \text{ }^\circ\text{C}$, en tanto que vale $1,00738 \text{ cal}/(\text{g}\cdot\text{K})$ a $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Por consiguiente, el calor específico del agua varía menos del 1% respecto de su valor de $1 \text{ cal}/(\text{g}\cdot\text{K})$ a $15 \text{ }^\circ\text{C}$, por lo que a menudo se le considera como constante.

Esta consideración nos es muy útil ya que entra dentro del rango de temperaturas de medición del proceso práctico.

Proceso práctico

Tomamos las medidas iniciales. Pesamos el calderín en vacío junto con la varita y seguidamente lo llenamos hasta la mitad del recipiente e introducimos hielo. Pesamos el conjunto de calderín, agua, hielos y varita agitadora. Valores obtenidos en gramos:

Masa (gr)	
M_0	189,8
M_i	531,2
M_a	341,4

M_0 : Masa del calorímetro en vacío

M_i : Masa del calorímetro lleno (calderín + varita + agua + hielo)

M_a : Masa del agua aportada (junto con los hielos)

Cerramos el calderín con una tapa que permite la agitación del agua mediante la varita y la medición de temperatura con un termómetro de líquido. Tomamos nota de las condiciones iniciales de temperatura y masa y procedemos a introducir la boquilla de vapor del calorímetro, dentro del conjunto del calderín cerrado. La introducción de la boquilla de vapor incrementa la temperatura del agua desde la temperatura inicial hasta la final en la que se obtiene el equilibrio. En el proceso de calentamiento, agitamos el agua mediante la varilla para obtener una medida uniforme de la temperatura y tomamos medidas. Valores obtenidos:

Temperatura (°C)	
T(10)	20
T(25)	23,5
T(40)	25,7
T(60)	28,5
T(1'20)	32
T(1'30)	33,5

$T(x)$: Temperatura en grados centígrados para cada medida de tiempo en segundos.

Llegado a este punto, tomamos nota de los nuevos valores obtenidos y apagamos el calorímetro. Por diferencia de pesadas obtenemos la masa de vapor (mv), responsable del proceso de calentamiento en el calorímetro.

Valores obtenidos:

Temp. (°C) / Masa (gr)	
T_i	13
M_i	531,2
T_f	33,5
M_f	551,8

T_i : Temperatura inicial del agua

M_i : Masa inicial del calorímetro lleno (cal.+agua+varita+hielo)

T_f : Temperatura final del agua

M_f : Masa final del agua (cal.+agua+varita+hielo)

De aquí se obtienen los valores:

$$\Delta T = T_f - T_i = 20,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$mv = M_f - M_i = 20,6 \text{ gr}$$

Mediante las tablas de las propiedades termodinámicas se obtienen los valores de entalpías específicas y los valores de la corrección de las lecturas barométricas. Como los valores de las tablas no se corresponden con los valores obtenidos, recurrimos a la interpolación de valores.

- Lectura del barómetro:

$$\text{Presión atmosférica} = 705 \text{ mm}, \quad T_a = 24^\circ\text{C}, \quad \text{corrección: } 2,75$$

Presión (atm.)	Temp. ($^\circ\text{C}$)	Entalpías (Kcal/h) - agua líquida	Entalpías (Kcal/h) - vapor agua
0,8	93	93	637
1	99,1	99	639

Tabla - Magnitudes termodinámicas del vapor de agua saturado

Temp. Barómetro	Lectura del Barómetro	
	700 mm	710 mm
2	0,23	0,23
4	0,46	0,46
..
22	2,51	2,54
24	2,73	2,77
26	2,96	3

Tabla - Corrección de lecturas barométricas

$$\text{Presión atmosférica} = 705 \text{ mm} - 2,75 = 702,25$$

$$10^5 \text{ Pa} = 1,023 \text{ atm} = 760 \text{ mm de Hg}$$

$$760 \text{ mm} \rightarrow 1,023 \text{ atm}$$

$$702,25 \text{ mm} \rightarrow x \text{ atm} \quad x = 0.945 \text{ atm}$$

- Obtención de entalpia de **agua líquida** por interpolación lineal en tabla "Magnitudes termodinámicas del vapor de agua saturado"

$$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{x - x_1}$$

$$\frac{99,1 - 93}{1 - 0,8} = \frac{y - 93}{x - 0,8} \xrightarrow{\text{despejando}} y = 30,5x + 68,6$$

$$\text{Para } x = 0.945 \text{ atm}, \quad y = 97,42 \text{ kcal/h}$$

- Obtención de entalpia de **vapor de agua** por interpolación lineal en tabla "Magnitudes termodinámicas del vapor de agua saturado"

$$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{x - x_1}$$

$$\frac{639 - 637}{1 - 0,8} = \frac{y - 637}{x - 0,8} \xrightarrow{\text{despejando}} y = 30,5x + 68,6$$

Para $x = 0.945 \text{ atm}$, $y = 638,45 \text{ kcal/h}$

Una vez obtenidos los valores de las entalpias de agua líquida y de vapor de agua, podemos obtener el valor de la entalpia específica del agua en estado líquido. Como el calor absorbido durante el calentamiento (proceso a $p = \text{cte.}$) corresponde a la variación de entalpias desde el estado inicial ($h_0 = 0$, $T_0 = 0^\circ\text{C}$) hasta el estado final (h_L , T_F) podemos realizar la siguiente aproximación:

$$Q_{\text{asb.}} = M_{H_2O} \cdot \Delta h = M_{H_2O} \cdot (h_L - h_0) = M_{H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot (T_F - T_0) \rightarrow$$

$$M_{H_2O} \cdot (h_L - h_0) = M_{H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot (T_F - T_0) \rightarrow h_L = h_0 + c_{H_2O} \cdot (T_F - T_0)$$

$$\text{Para } h_0 = 0 \left(\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}} \right), \quad c_{H_2O} = 1 \left(\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}} \right), \quad T_0 = 0 \text{ K} \rightarrow$$

$$h_L \approx T_F = 33,5 \frac{\text{cal}}{\text{gr}} = 33,5 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Por tanto el cuadro resumen de valores de entalpias sería el siguiente:

	Entalpia (kcal/kg)
h_L	97,42
h_{VS}	638,45
h'_L	33,5

h_L : Entalpia específica del agua líquida a temp. inicial

h_{VS} : Entalpia específica del vapor saturado

h'_L : Entalpia específica del agua líquida a temp. final

Para el cálculo del título de vapor,

- Calor cedido por el vapor húmedo:

$$Q = H_I - H_F = H_{VS} + H_L - H'_L = M_{VS}h_{VS} + M_Lh_L - M_T h'_L \quad (1)$$

Como:

$$x = \frac{M_{VS}}{M_T} \rightarrow M_{VS} = x M_T \quad M_T = M_{VS} + M_L \rightarrow M_L = M_T - M_{VS} \quad (2)$$

Sustituyendo (2) en (1):

$$Q = x M_T h_{VS} + (M_T - M_{VS}) h_L - M_T h'_L \xrightarrow{\text{simplifico}} Q = x M_T h_{VS} + (1 - x) M_T h_L - M_T h'_L \quad (3)$$

- Calor absorbido por el calorímetro

$$Q = M_1(T_2 - T_1) + K(T_2 - T_1) = (M_1 + K)(T_2 - T_1)$$

(4)

teniendo los valores:

$$M_1 = M_{A.inicio} = M_i - M_0 = 531,2 - 189,8 = 341,4 \text{ gr}$$

$$M_2 = M_{A.final} = M_F - M_0 = 551,8 - 189,8 = 362 \text{ gr}$$

$$M_{VS} = M_F - M_i = 551,8 - 531,2 = 20,6 \text{ gr}$$

$$T_1 = T_i = 13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = T_F = 33,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

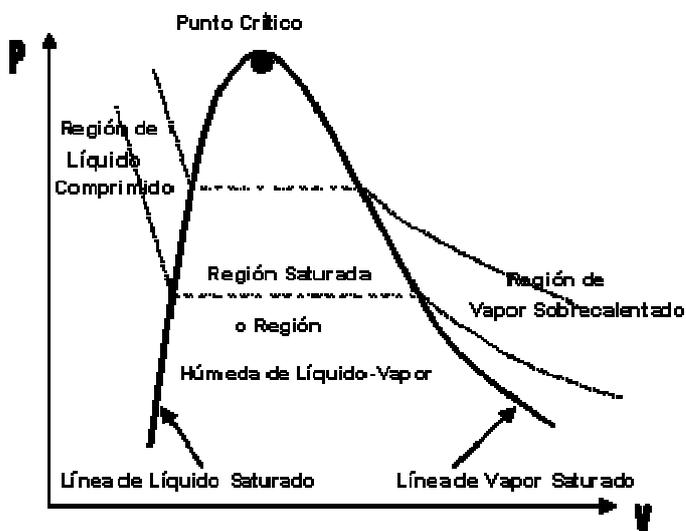
$$K_{LATORN} = c_{e.L} \cdot M_0 = 0,212 \frac{\text{cal}}{\text{gr } ^\circ\text{C}} \cdot 189,8 \text{ gr} = 40,238 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{C}}$$

Tabla resultados	
M ₁	341,4
M ₂	362
M _{VS}	20,6
T ₁	13
T ₂	33,5
K	40,238
h _L	97,42
h _{VS}	638,45
h' _L	33,5

igualando y despejando (3) y (4) junto con los valores de la tabla resumen:

$$x = \frac{(M_1 + K)(T_2 - T_1) + (M_2 - M_1)(h'_L - h_L)}{(M_2 - M_1)(h_{VS} - h_L)} = \frac{(341,4 + 40,238)(33,5 - 13) + (362 - 341,4)(33,5 - 97,42)}{(362 - 341,4)(638,45 - 97,42)} = 0,5838$$

Se a obtenido un título de vapor igual a 0,5838 (58,38%), es decir la fracción de agua contenida en la cantidad de calor, que oscila entre entre el 0'6 y el 0'8 ($\approx 60\%$). Por tanto es un resultado válido para la obtención del título de vapor.



Aquí incluimos el gráfico, donde podemos observar el desarrollo de la práctica.

Cálculo de errores

Para el cálculo de errores en las medidas de temperatura se observa la precisión del aparato de medida y ese es el posible error en la medida:

$$M_1 = M_{A.inicio} = M_i - M_0 = (531,2 \pm 0,1) - (189,8 \pm 0,1) = 341,4 \text{ gr} \pm 0,2 \text{ gr}$$

$$M_2 = M_{A.final} = M_F - M_0 = (551,8 \pm 0,1) - (189,8 \pm 0,1) = 362 \text{ gr} \pm 0,2 \text{ gr}$$

$$M_{VS} = M_F - M_I = 20,6 \text{ gr} \pm 0,2 \text{ gr}$$

$$T_1 = T_I = 13 \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = T_F = 33,5 \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$K_{LATON} = c_{e.L} \cdot M_0 = 0,212 \frac{\text{cal}}{\text{gr } ^\circ\text{C}} \cdot 189,8 \text{ gr} = 40,238 \pm 0,001 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{C}}$$

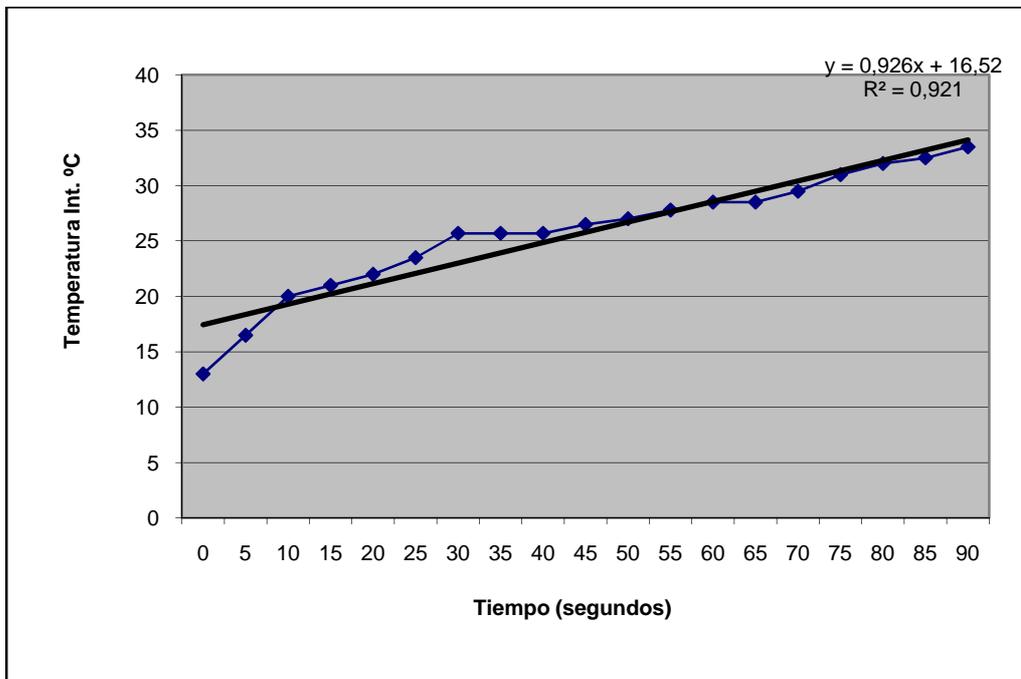
Se ha tomado los valores del proceso de calentamiento del líquido hasta el punto de saturación. Se ha aproximado a una ecuación lineal y se han obtenido los coeficientes del error.

En primer lugar obtengo la línea de mínimos cuadrados. Como resultado obtenemos:

$$y = 0,926x + 16,52$$

Con el coeficiente de regresión lineal $r = 0,921$

Representación gráfica con inclusión de error



Con la ecuación de la recta

$$y = 0.926x_i + 16,52$$

$y = ax_i + b$, obtenidos los valores $a = 0.926$, $b = 16,52$

Para el cálculo de los errores, se emplean las ecuaciones:

$$\alpha y^2 = \frac{1}{n-2} \sum (y - ax_i - b)^2$$
$$\Delta K = \alpha y \sqrt{\frac{n}{n \sum (x_i^2) - (\sum x_i)^2}}$$

Obteniendo los valores:

$$\alpha y^2 = 30,61875$$

$$\Delta K = 0,03317$$

Por tanto el error sería el siguiente:

$$k = 0,93 \pm 0,03$$

Resumen y conclusiones

En esta práctica hemos podido observar el porcentaje en masa de vapor de la mezcla de líquido y vapor.

Como ya hemos visto, el título de vapor es 58.38%, por lo que es un resultado válido para un título de vapor húmedo. Es un resultado medio, es decir, está equilibrado el líquido saturado y el vapor saturado; no hay una gran diferencia de cantidad. Por lo que podremos observar líquido en el fondo del recipiente, por efecto de la gravedad, y vapor en la parte superior del recipiente.