

TERMODINÁMICA DEL VAPOR

Definiciones

Calor. La energía se define como causa de cambio de estado de los cuerpos, donde el cambio de estado implica la modificación de los parámetros que los caracterizan o de su estado de movimiento en el espacio.

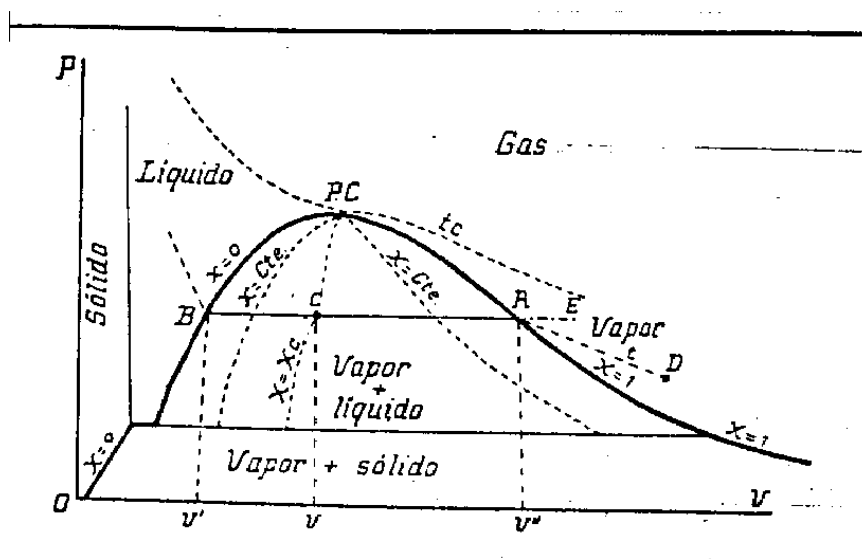
Dos o más cuerpos no están en equilibrio cuando entre ellos es posible que se ejerza alguna acción, es decir, algún intercambio o paso de energía. Cuando el intercambio se debe a una diferencia de temperaturas, la energía intercambiada se llama calor.

Si la temperatura del cuerpo aumenta, la energía recibida se denomina calor sensible.

Si el cuerpo absorbe la energía recibida para producir cambios de estado físico a temperatura constante ($t = \text{cte.}$), se lo denomina calor latente.

Vapor. Estado de agregación gaseosa de una sustancia que en C.N. P. y T. ($p_0 = 1 \text{ ata}$; $t_0 = 15^\circ \text{C}$) es un líquido. Constituye un sistema heterogéneo por tener más de una fase (sólida, líquida o gaseosa), formado por un solo componente.

En la figura se representan en el plano (p,v) los distintos estado y fases de una sustancia que cambia de estado.



Referencias:

V = vapor

L = líquido

S = sólido

P.C. = punto crítico, por encima de él es imposible distinguir el paso de gas a líquido. Los parámetros que caracterizan este punto, llamados críticos (p_c , v_c y T_c), son constantes para cada sustancia.

La curva de la izquierda ($x = 0$) que partiendo del origen de coordenadas llega hasta el P.C., se denomina "límite inferior" corresponde al líquido en ebullición o saturado, sin presencia de vapor.

La curva de la derecha ($x = 1$) que desciende desde el P.C. se denomina “límite superior” y corresponde al vapor sin presencia de líquido.

Así pueden distinguirse distintas clases de vapor :

vapor saturado seco . vapor sin presencia de líquido (punto A, curva $x = 1$).

vapor saturado . vapor en presencia de líquido y en equilibrio con él.

vapor húmedo . mezcla de vapor saturado y líquido (punto C).

vapor sobrecalentado . vapor saturado seco calentado a presión constante hasta una temperatura mayor que la de saturación (punto D, curva $p = \text{cte.}$).

vapor recalentado . vapor que luego de producir su efecto térmico o realizar trabajo, es vuelto a calentar en la caldera hasta su temperatura de saturación.

Calores Latentes

Como se señalara antes, se denominan así a las cantidades de energía térmica que se deben suministrar o quitar a un cuerpo para producirle un cambio de estado físico.

En consecuencia se definen :

calor latente de evaporación o vaporización (r). Cantidad de calor que debe entregarse a la unidad de masa de un líquido en ebullición para transformarlo en vapor saturado seco a las mismas temperatura y presión.

calor latente de fusión (f). Cantidad de calor que debe entregarse a la unidad de masa de un sólido para transformarlo en líquido a las mismas temperatura y presión.

calor latente de sublimación (s). Cantidad de calor que debe entregarse a la unidad de masa de un sólido para transformarlo directamente en vapor a las mismas temperatura y presión.

Para producir los cambios de estado físico opuestos a los definidos, deben quitarse de la unidad de sustancia, cantidades de calor iguales a las suministradas para producir los cambios señalados.

Así el opuesto al calor de vaporización, es el calor latente de condensación; al de fusión es el calor latente de solidificación y al de sublimación es el calor latente de condensación - solidificación.

Por tratarse de transformaciones a $p = \text{cte.}$ sus valores están medidos por la diferencia de valores que adquiera la función entalpía (h) en los estados de líquido en ebullición, de vapor saturado seco y de sólido.

Siendo :

h'' = entalpía del vapor saturado seco;

h' = entalpía del líquido saturado;

h_s = entalpía del sólido.

entonces :

$$r = h'' - h'$$

$$f = h' - h_s$$

$$s = h'' - h_s$$

verificándose que : $s = r + f$; es decir que $s > r$.

El calor de vaporización, que es el que interesa en el estudio de los vapores, puede expresarse teniendo en cuenta la definición de la función de estado “ entalpía ”, es decir :

$$h = U + p v$$

con :

U = energía interna del sistema

p = presión del sistema

v = volumen específico del sistema

Entonces, se puede expresar :

$$r = (U'' + p v'') - (U' + p v')$$

siendo :

U'' = energía interna del vapor saturado seco;

U' = energía interna del líquido saturado;

p = presión de saturación del vapor;

v'' = volumen específico del vapor saturado seco;

v' = volumen específico del líquido saturado.

Agrupando resulta :

$$r = (U'' - U') + p (v'' - v')$$

donde :

$U'' - U'$: representa el calor interno de vaporización;

$p (v'' - v')$: representa el trabajo de expansión que el vapor realiza contra la presión exterior o presión de equilibrio.

Unidades . Las unidades en que se expresan los calores latentes son :

Cal / kg; J / kg o kJ / kg

(Cal = kilocaloría); J = joule o kJ = kilojoule)

Título del Vapor

Se lo define como la masa de vapor por cada kilogramo de mezcla (vapor húmedo) y se lo simboliza con x . Así, 1 kg de vapor húmedo contiene x kg de vapor y $(1-x)$ kg de líquido.

Si el sistema está formado por un kilogramo de mezcla, el volumen específico (v) que ocupa, es la suma de cada fase :

$$v = x v' + (1-x) v'' = v' + x (v'' - v')$$

despejando : $x = \frac{v - v'}{v'' - v'}$ = título del vapor

De la figura resulta :

$$v - v' = BC$$

$$v'' - v' = BA$$

entonces :

$$x = \frac{BC}{BA}$$

Dividiendo en partes iguales los segmentos horizontales como el BA y uniendo los puntos de igual cota se obtienen las curvas de título constante ($x = cte.$) .

Tablas de Vapor

Como se definiera antes, los cambios de estado físico son transformaciones que se efectúan a presión y temperatura constantes, razón por la cual, a diferencia de los gases, cuando el vapor, se encuentra en equilibrio con su líquido, fijando uno solo de los parámetros ya queda determinado el estado del sistema.

Es decir que para cada valor de presión correspondiente a la saturación del vapor, existe un, y solo uno, valor de temperatura correspondiente a la saturación del vapor.

Sobre esta base, las tablas de vapor tabulan el par de valores correspondientes a la saturación, de la presión y la temperatura y en correspondencia con ellos, los valores de otras magnitudes referidas al líquido (en ebullición) y al vapor saturado, tales como volumen específico (v), entalpías (h) y los respectivos valores de la función de estado “ entropía ” (s) ya vista en el Curso de Refrigeración, así como los calores de vaporización (r) y las entropías correspondientes a ellos.

Otras tablas de vapores presentan los valores de v ; h y s para una gama más limitada de presiones y temperaturas de saturación, pero en correspondencia con un conjunto más amplio de temperaturas diferentes de la de saturación.

Diagramas Entrópicos

Por la practicidad y conveniencia que significa poder visualizar el estado de un vapor y seguir su evolución, los valores de las tablas se vuelcan en gráficos donde se representan alguna de las magnitudes o parámetros en función de la entropía (S).

Los más comúnmente utilizados son los que se describen a continuación.

Diagrama T - S. En este diagrama se llevan las temperaturas en el eje de ordenadas y las entropías en el de abscisas, trazándose el gráfico sobre la base de las consideraciones que se detallan más adelante.

Para el origen de coordenadas.

Entropía inicial $S_0 = 0$ para el estado líquido a 0°C .

La temperatura inicial T_0 también se elige arbitrariamente por comodidad.

Para el estado líquido.

Se traza hasta el punto crítico (P.C.), la curva límite inferior o de líquido saturado, considerando que éste es poco compresible, utilizando la expresión simplificada :

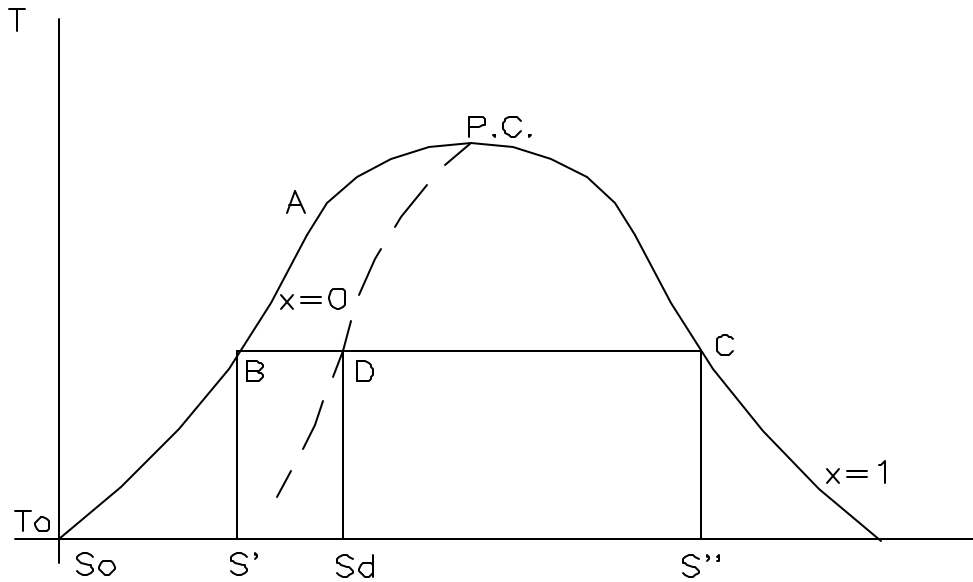
$$S' - S_0 = c_L \ln \frac{T}{T_0}$$

con :

S' = entropía de un punto cualquiera para el estado líquido (Cal / K o kJ / K)

c_L = calor específico del líquido; constante física que se encuentra tabulada en Cal / kg $^\circ\text{C}$ o kJ / kg K ;

T = temperatura absoluta del líquido correspondiente a la entropía S .



Se aplica la expresión :

$$S'' - S' = \frac{r}{T}$$

con:

S'' = entropía del vapor saturado seco (Cal / K o kJ / K);

S' = entropía del líquido saturado o en ebullición (Cal / K o kJ / K).

Pero de la figura se observa que :

$$S'' - S' = BA = \begin{bmatrix} r \\ T \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, los segmentos determinan para cada temperatura (T) un punto que corresponde a la curva límite superior o de vapor saturado seco, lo cual permite trazarla a partir del punto crítico (P.C.)

Para las curvas de entalpía constante.

Se considera al diagrama dividido en tres regiones para el trazado de las curvas de $h = \text{cte.}$

En la región de líquido se trazan las isoentálpicas mediante la expresión :

$$h_L = c_L t$$

con:

h_L = entalpía del líquido en ese estado;

c_L = calor específico del líquido;

t = temperatura considerada.

Si el líquido es agua, la entalpía h_L es numéricamente igual a la temperatura t puesto que en ese caso $c_L = 1 \text{ Cal / kg } ^\circ\text{C}$.

En la región de vapor húmedo las isoentálpicas se obtienen aplicando la expresión :

$$\mathbf{h}_X = \mathbf{h}' + \mathbf{r} \mathbf{x}$$

donde h_x es la entalpía del vapor húmedo (líquido + vapor) en un punto donde la mezcla tiene un título x .

En la región de vapor sobrecalentado se determinan las isoentálpicas aplicando la expresión :

$h = c_L t + r + c_p (t - t_s)$, que da la entropía del vapor sobrecalentado a la temperatura t ,

siendo t_s la temperatura de saturación y c_p el calor específico a presión constante del vapor.

Diagrama h - S de Mollier . En este diagrama se llevan las entalpías en el eje de ordenadas, representándose las restantes magnitudes o parámetros, sobre la base de consideraciones similares a las efectuadas para el trazado del diagrama T - S.

Para el estado líquido.

$$S' = S_0 + c_L \ln \frac{T}{T_0}$$

$$h' = h_0 + c_L t$$

con: h_0 = entalpía inicial o al origen, elegida arbitrariamente.

Para la zona heterogénea (mezcla o de vapor húmedo).

$$S = S' + x (S'' - S')$$

$$h = h' + x (h'' - h')$$

Despejando x de ambas e igualándolas resulta :

$$x = \frac{h - h'}{h'' - h'} = \frac{S - S'}{S'' - S'} ; \text{ entonces :}$$

$$h - h' = \frac{h'' - h'}{S'' - S'} (S - S')$$

$$h - h' = \frac{h'' - h'}{S'' - S'} (S - S') ; \text{ que es la ecuación de una recta que pasa por los puntos}$$

A (h' ; S') y B (h'' ; S'').

Para el vapor saturado.

Los puntos de la curva límite superior, en este diagrama, se obtienen aplicando las expresiones :

$$S'' = S' + \frac{r}{T}$$

$$h'' = h' + r$$

En algunos casos, para mayor claridad del dibujo, estos diagramas se trazan ejes oblicuos, en cuyo caso las isoentálpicas son rectas paralelas al eje de las entropías.

