

FENÓMENOS DE TRASPORTE EN METALURGIA EXTRACTIVA

Clase 02/06

Transporte de Calor

Prof. Leandro Voisin A, MSc., Dr.

Académico – Universidad de Chile

Jefe del Laboratorio de Pirometalurgia

Investigador Senior - Tohoku University, Japan.

Balances de calor (Entalpía)

Cuando se efectúan balances de energía sobre los procesos se requiere conocer la entalpía (H) de varias especies en el sistema. Esta se define como:

$$H = U + P \cdot V$$

donde: U es la energía interna, V es el volumen del sistema y P la presión. PV representa la energía asociada con la creación del espacio que esta ocupando el sistema.

La entalpía representa la energía total del sistema, y es una propiedad de estado que tiene un valor único para cada condición dada. Cuando una sustancia va de una condición a otra, el cambio de entalpía (ΔH) tiene un valor único fijo.

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(P \cdot V)$$

Ejemplo 7:

Un ser humano consume cerca de 1500 kcal por día. Determinar el consumo diario de glucosa en kg. asumiendo que todo el alimento consumido es glucosa ($C_6H_{12}O_6$) y que la reacción total es:



$$\Delta H^{\circ} = -673 \text{ kcal}$$

Ejemplo 7, Solución:

El ΔH° de la reacción es negativo por lo tanto hablamos de una reacción que libera energía. Esto significa que si se consume un mol de glucosa se liberan 673 kcal de energía.

Asumiendo que la energía liberada debido al consumo de glucosa es igual al consumo diario de energía, el número de moles de glucosa consumido diariamente es:

$$\frac{1500}{673} = 2.23 \text{ mol} \cdot 180 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 401 \text{ g}$$

Balances de calor (Capacidad de calor)

En muchas situaciones interesa determinar cuanta energía se requiere para calentar determinada cantidad de material desde una temperatura a otra ó cuanta energía se libera por el enfriamiento. Esto requiere conocer la capacidad de calor de la sustancia. C_p se define como la energía requerida para calentar una cantidad unitaria de sustancia un grado a presión constante, así

$$C_p = \left(\frac{dH}{dT} \right)_P$$

donde:

*H - Entalpía de una cantidad unitaria de sustancia
J/molK, kJ/kg°C*

Balances de calor (Capacidad de calor)

$$C_p = \left(\frac{dH}{dT} \right)_P$$

<i>Sustancia</i>	<i>J/mol·°C</i>	<i>kJ/kg·°C</i>	<i>kJ/m³·°C</i>
<i>Aire</i>	28,8	1,0	1,2
<i>Agua</i>	75,6	4,2	4200
<i>Cobre</i>	24,2	0,38	3410
<i>Cuarzo</i>	16,3	0,796	1320

Capacidades de calor de sustancias comunes

Balances de calor (Capacidad de calor)

La capacidad de calor aumenta ligeramente con la temperatura y puede expresarse como función de ella a través de polinomios:

$$C_p = a + bT + cT^{-1}$$

donde las constantes a , b y c se encuentran en tablas.

Para calcular la energía requerida para calentar una sustancia de una masa m desde una temperatura T_1 a T_2 , se tiene que integrar la capacidad de calor entre ambas temperaturas:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} m C_p dT = m \left[a(T_2 - T_1) + \frac{b}{2} (T_2^2 - T_1^2) + c \left(\ln \frac{T_2}{T_1} \right) \right]$$

Balances de calor (Capacidad de calor)

ó bien cuando C_p es independiente de T :

$$\Delta H = mC_p \Delta T$$

Las capacidades de calor son cercanamente aditivas por lo que una mezcla puede ser estimada por:

$$C_{p,m}(T) = \sum x_i C_{p,i}(T)$$

donde: $C_{p,m}(T)$ es la capacidad de calor de la mezcla por masa ó por mol, x_i es la fracción másica ó fracción molar del término i , y $C_{p,i}(T)$ es la correspondiente capacidad de calor.

Balances de calor (Capacidad de calor)

Ejemplo 8:

En un cierto proceso se decide reducir el flujo de agua caliente (40 °C) desde 20 a 8 l/min. Sobre una base diaria ¿Cuánta energía se ahorra si el agua entra a 15 °C?. La capacidad de calor del agua es 1.0 cal/°C·g y la densidad de 1.0 g/l.

Ejemplo 8, Solución:

De los datos se obtiene que la capacidad de calor del agua es 1 kcal/l°C. Entonces la energía ahorrada es:

$$Q = (20 - 8) \frac{l}{min} \cdot 60 \cdot 24 \text{ min} (40 - 15)^\circ C \cdot 1 \frac{kcal}{l^\circ C}$$

$$Q = 432000 \text{ kcal}$$

Balances de calor (Capacidad de calor)

Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se usan extensivamente en la industria para transferir calor de un fluido a otro. El principio fundamental:

Energía ganada fluido A = energía perdida fluido B

En situaciones en que no hay cambios de fase, esto se expresa matemáticamente por:

$$m_A \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right) \cdot \int_{T_{in}}^{T_{out}} C_{p,A} dT = m_B \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right) \cdot \int_{T_{out}}^{T_{in}} C_{p,B} dT$$

Intercambiadores de calor

Energía ganada fluido A = energía perdida fluido B

$$m_A \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right) \cdot \int_{T_{in}}^{T_{out}} C_{p,A} dT = m_B \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right) \cdot \int_{T_{out}}^{T_{in}} C_{p,B} dT$$

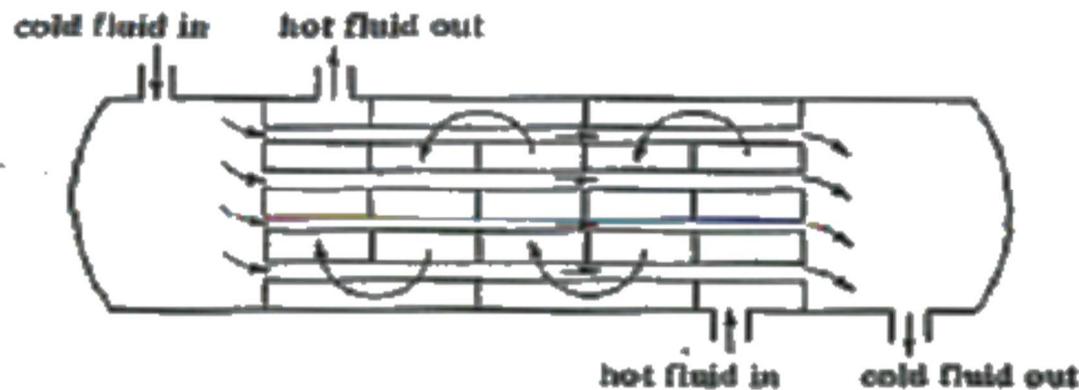


Ilustración esquemática de un intercambiador de calor

Balances de calor (Capacidad de calor)

Ejemplo 9:

Durante el moldeo del acero una ducha continua de agua se usa para enfriar el acero sólido de 1300 a 200 °C.

Un moldeador procesa 500 t por día de acero. El agua entra al moldeador a 20 °C y sale a 50 °C. Calcular los requerimientos de agua de enfriamiento.

$$C_{p_{H_2O}} = 1 \text{ kcal/}^{\circ}\text{C}\cdot\text{kg}, C_{p_{acero}} = 0.14 \text{ kcal/}^{\circ}\text{C}\cdot\text{kg}.$$

Balances de calor (Capacidad de calor)

Ejemplo 9, Solución:

$$(1300 - 200)^{\circ} C \cdot 500000 \frac{kg}{d} \cdot 0.14 \frac{kcal}{kg^{\circ} C} = (50 - 20)^{\circ} C \cdot m_{H_2O} \cdot 1 \frac{kcal}{kg^{\circ} C}$$

$$m_{H_2O} = 2567000 \frac{kg}{d} = 2567 \frac{t}{d} = 2567 \frac{m^3}{d}$$

En principio, éste es un tipo de intercambiador de calor donde la energía pérdida por el acero iguala a la energía ganada por el agua.

Balances de calor (Calor de transformación)

Cuando una sustancia cambia su forma física, ya sea por fusión, vaporización ó sublimación, energía es requerida ó emitida pues la sustancia cambia su energía interna y posiblemente también su volumen:

$$\Delta H(T) = \Delta H^{\circ}(25^{\circ}\text{C}) + \int_{25}^{T_1} \Delta C_{p,1} dT \pm \Delta H_{trans}^{\circ}(T_1) + \int_{T_1}^{T_2} \Delta C_{p,2} dT$$

- ✓ *Calor latente de vaporización (ΔH_v) es la energía requerida para vaporizar una cantidad unitaria de líquido a T° y P° constantes.*
- ✓ *Calor latente de fusión (ΔH_f) es la energía requerida para fundir una cantidad unitaria de sólido a T° y P° constantes.*
- ✓ *Calor latente de sublimación (ΔH_s) es la energía requerida para vaporizar una cantidad unitaria de sólido T° y P° constantes.*

Balances de calor (Calor de transformación)

$$\Delta H(T) = \Delta H^{\circ}(25^{\circ}\text{C}) + \int_{25}^{T_1} \Delta C_{p,1} dT \pm \Delta H_{trans}^{\circ}(T_1) + \int_{T_1}^{T_2} \Delta C_{p,2} dT$$

Cuando el proceso opuesto toma lugar (enfriamiento en vez de fusión, condensación en vez de vaporización) el cambio de energía es opuesto.

Debido a que los términos son aditivos la entalpía a cualquier temperatura puede ser calculada según:

$$\Delta H_{T_2} = (H_{T_2} - H_{T_1}) = \int_{T_1}^{T_t} \Delta C_{p(T_1 \rightarrow T_t)} dT \pm L_t + \int_{T_t}^{T_2} \Delta C_{p(T_t \rightarrow T_2)} dT$$

Ecuación de Balance de Calor

Ejemplo 10:

Calcular la energía requerida para transformar 1 kg de hielo a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ en vapor de agua a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ejemplo 10, Solución:

El proceso completo de transferir hielo a vapor consiste de varias etapas y la energía total puede ser encontrada por la suma de cada término individual. Las etapas involucran fusión, calentamiento y vaporización.

$$\Delta H^{\circ} (kJ) = \dots$$

$$\dots \int_{-25}^0 C_{p,\text{hielo}} dT + \Delta H_f + \int_0^{100} C_{p,\text{agua}} dT + \Delta H_v + \int_{100}^{150} C_{p,\text{vapor}} dT$$

Ejemplo 10, Solución:

$$\Delta H^{\circ} (kJ) = \int_{-25}^{0} C_{p,hielo} dT + \Delta H_f + \int_{0}^{100} C_{p,agua} dT + \Delta H_v + \int_{100}^{150} C_{p,vapor} dT$$

$$\Delta H^{\circ} (kJ) = \int_{-25}^{0} 2.05 dT + 334 + \int_{0}^{100} 4.24 dT + 2257 + \int_{100}^{150} 2.0 dT$$

$$51.3 + 334 + 424 + 2257 + 100 = 3166 \text{ kJ}$$

Se puede observar que la energía requerida para vaporizar el agua (2257 kJ/kg) corresponde a cerca del 71 % de la energía total. Razón principal porque el agua es un eficiente agente de enfriamiento.

Balances de calor (Tablas de vapor)

*El agua es una sustancia común en los procesos metalúrgicos y algunas de sus propiedades han sido compiladas en un conjunto de tablas denominadas “**tablas de vapor**”, en donde se presenta la presión de vapor, la entalpía de agua líquida y la entalpía de vapor de agua como una función de la temperatura en condiciones de saturación.*

En estas tablas los valores de entalpía son referenciados a la entalpía del agua líquida la cual está definida como cero en el punto triple.

Vapor saturado: vapor de agua en equilibrio con agua líquida.

Balances de calor (Tablas de vapor)

Tabla de Vapor A
Propiedades de vapor
saturado y agua

T(°C)	P(bar)	H(kJ/kg) Water	H(kJ/kg) Steam
0.01	0.00611	0.0	2501.6
4	0.00813	16.8	2508.9
8	0.01072	33.6	2516.2
12	0.01401	50.4	2523.6
16	0.01817	67.1	2530.9
20	0.0234	83.9	2538.2
23	0.0264	92.2	2541.8
24	0.0298	100.6	2545.5
26	0.0336	108.9	2549.1
30	0.0424	125.7	2556.4
34	0.0532	142.4	2563.6
40	0.0738	167.5	2574.4
50	0.1234	209.3	2592.2
60	0.1992	251.1	2609
70	0.3117	293.0	2626
80	0.4736	334.9	2643
90	0.7011	377.0	2659
100	1.013	419.1	2676
151.8	5.0	640.1	2747.5
179.9	10.0	762.6	2776.2
212.4	20.0	908.6	2797.2
250.3	40.0	1087.4	2800.3
275.6	60.0	1213.7	2785.0
295.0	80.0	1317.1	2759.9
311.0	100	1408	2727.7
342.1	150	1611	2615
365.7	200	1826.5	2418.4

Balances de calor (Tablas de vapor)

Por ejemplo, a 80 °C la presión de vapor es 0,476 bar (47,36 kPa). Si agua a 80 °C se pone en un estanque cerrado donde la presión de vapor de agua es menor a 47,36 kPa, algo de agua se vaporizará, y continuará haciéndolo hasta que la presión de vapor del estanque sea 47,36 kPa.

Esto es independiente si hay presentes otros gases. Como se espera a 100 °C la presión de vapor es 101,35 kPa ó 1 atm.

En algunos casos el vapor de agua (ó vapor) es sobrecalentado, significa que esta calentado por sobre su temperatura de equilibrio. Existen otras tablas que describen este efecto.

Balances de calor (Tablas de vapor)

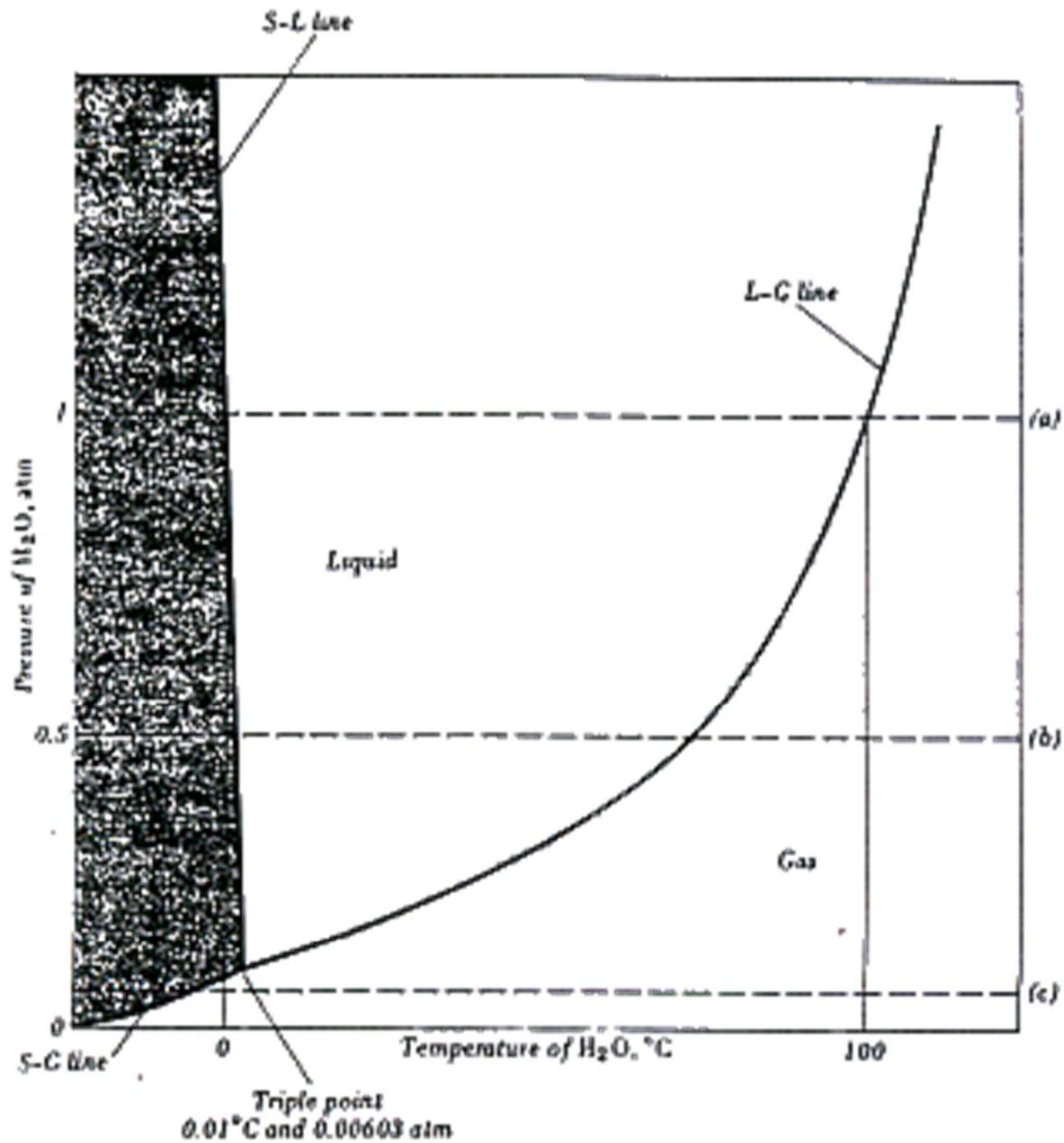
Tabla de vapor B

*Entalpía específica de vapor sobrecalentado (kJ/kg)
en función de la presión (bar) y la temperatura*

Bar	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C	450 °C	500 °C
0.0	2689	2784	2880	2978	3077	3177	3280	3384	3497
0.1	2688	2783	2880	2977	3077	3177	3280	3384	3489
0.5	2683	2780	2878	2979	3076	3177	3279	3383	3489
1.0	2676	2776	2875	2975	3074	3176	3278	3382	3488
5.0	-	-	2855	2961	3065	3168	3272	3379	3484
10	-	-	2827	2943	3052	3159	3264	3371	3478
20	-	-	-	2902	3025	3139	3249	3358	3467
40	-	-	-	-	2962	3095	3216	3331	3445
60	-	-	-	-	2885	3046	3180	3303	3422
80	-	-	-	-	2787	2990	3142	3274	3399
100	-	-	-	-	-	2926	3100	3244	3375

Se puede observar que para una presión fija, la entalpía aumenta significativamente con el aumento de temperatura. Por otro lado, para una temperatura dada la entalpía disminuye ligeramente con el aumento de la presión.

Balances de calor (Tablas de vapor)



Balances de calor (Tablas de vapor)

Ejemplo 11:

Una planta de manufactura pasa 50.000 kg/h de vapor sobrecalentado a una presión de 10 bar y 300 °C, a través de una turbina para generar electricidad. El vapor que deja la turbina está saturado a una presión de 5 bar.

¿Cuál es la máxima cantidad de energía eléctrica que puede ser generada?

Ejemplo 11, Solución:

Ya que el vapor de entrada es sobrecalentado tenemos que usar la **Tabla B** para encontrar la entalpía a 10 bar y 300 °C, la entalpía del vapor de entrada es de 3052 kJ/kg.

De la **Tabla A** vapor saturado a 5 bar tiene una temperatura de 151,8 °C y una entalpía de 2727.5 kJ/kg.

La máxima tasa de energía eléctrica que puede producirse es:

$$Potencia = \frac{(3052 - 2727.5) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 50000 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} = 4230 \text{ kW}$$

Balances de calor (Tablas de vapor)

Ejemplo 12:

Un flujo de 2000 kg/h de gases calientes a 1200 °C es enfriado a 300 °C en un intercambiador de calor.

El medio de enfriamiento es agua líquida que entra al intercambiador a 20 °C y lo deja como vapor sobrecalentado a 10 bar y 350 °C.

La capacidad de calor de los gases se asume constante e igual a 1.13 kJ/kg°C.

¿Cuál es la tasa de producción de vapor sobrecalentado?

Balances de calor (Tablas de vapor)

Ejemplo 12, Solución:

En el intercambiador de calor mencionado, la energía de los gases calientes es absorbida por el agua. Entonces:

$$(1200 - 300)^{\circ} C \cdot 2000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1.13 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^{\circ} C} = m_{\text{vapor}} \cdot (3159 - 83.9) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$m_{\text{vapor}} = 661 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$