

Universidad Nacional Autónoma de México
 Facultad de Química
 Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Introducción a la Ingeniería de Procesos Metalúrgicos y de Materiales
 Profesor: Luis Enrique Jardón Pérez

**Ejemplo de balance macroscópico de energía térmica
 (Horno de eje)**

Un horno de eje se utiliza para fundir cátodos de cobre. Las láminas de cobre se alimentan en la parte superior del horno a 25 °C, mientras que un quemador posicionado en el fondo de éste proporciona el calor necesario para la fusión. El quemador se alimenta con aceite que tiene 87.4 % C (el resto es H), cuya combustión produce 4967.50 cal por cada gramo de aceite y que opera con un exceso de aire del 10 %. Ambos, el aceite y el aire entran al quemador a 25 °C. El cobre fundido abandona el horno a 1200 °C y los gases productos de la combustión abandonan el mismo a 750 °C.

- a) Calcule la composición de los gases que salen del horno.
- b) Calcule la masa de aceite requerida para fundir una tonelada métrica de cobre si el sistema se considera adiabático. La temperatura de fusión del cobre es de 1085 °C y su entalpia de fusión es de 3.1 Kcal/mol.
- c) Calcule la masa de aceite requerida para fundir una tonelada métrica de cobre si existen pérdidas de calor del 10%.
- d) Realice el diagrama de Sankey para el horno de eje, ya sea considerando el sistema adiabático o bien con las pérdidas de calor.

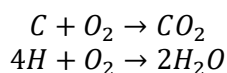
Tabla 1. Datos para el problema.

Material	ΔH° [Kcal/mol]	M [g/mol]	C_p [cal/molK]	Limites [K]
O ₂ (g)	0.00	31.998	$7.16 + 0.001T - 40000T^{-2}$	298-3000
N ₂ (g)	0.00	28.014	$6.66 + 0.00102T$	298-2500
CO ₂ (g)	-94.05	44.009	$10.55 + 0.00216T - 204000T^{-2}$	298-2500
H ₂ O (g)	-57.80	18.015	$7.17 + 0.00256T + 8000T^{-2}$	298-2500
Cu (s)	0.00	63.546	$5.41 + 0.0015T$	298-1358
Cu (l)	0.00	63.546	7.50	1358-2500

Solución:

- a) Calcule la composición de los gases que salen del horno.**

Tomaremos como base de cálculo 1 g de aceite. Primero planteamos un par de reacciones con el O₂ con la finalidad de calcular la cantidad de O₂ requerida y los productos de combustión generados, sin embargo, hay que considerar que el aceite es una mezcla de hidrocarburos y estas reacciones no representan la combustión del aceite:



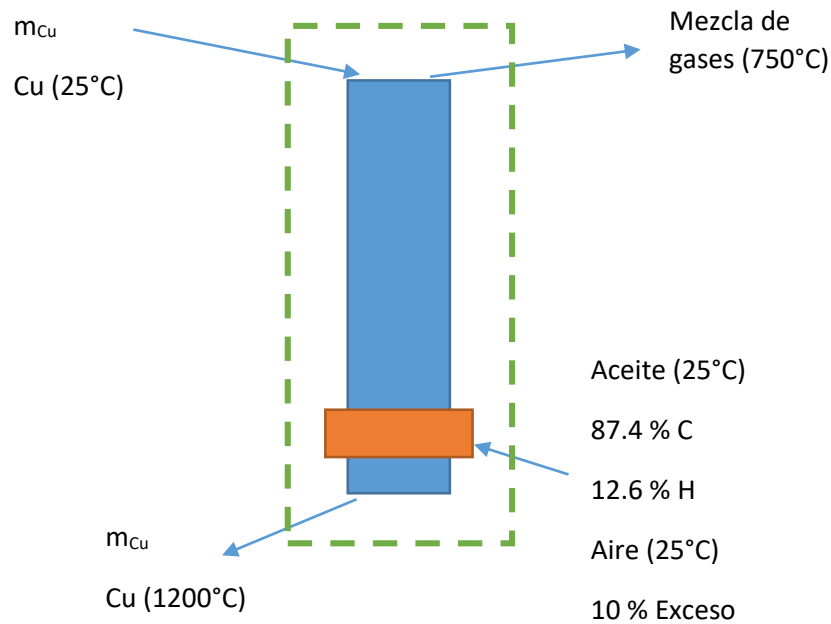


Figura 1.- Esquema del horno eje con entradas conocidas.

1 g de aceite contiene 0.874 g de C y 0.126 g de H, por lo que podemos calcular los términos fuente a partir de dicha información:

$$0.874 \text{ g C} \left(\frac{1 \text{ mol C}}{12 \text{ g C}} \right) = 0.07283 \text{ mol C}$$

$$0.126 \text{ g H} \left(\frac{1 \text{ mol H}}{1 \text{ g H}} \right) = 0.126 \text{ mol H}$$

$$0.07283 \text{ mol C} \left(\frac{1 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol C}} \right) = 0.07283 \text{ mol O}_2$$

$$0.07283 \text{ mol C} \left(\frac{1 \text{ mol CO}_2}{1 \text{ mol C}} \right) = 0.07283 \text{ mol CO}_2$$

$$0.126 \text{ mol H} \left(\frac{1 \text{ mol O}_2}{4 \text{ mol H}} \right) = 0.0315 \text{ mol O}_2$$

$$0.126 \text{ mol H} \left(\frac{2 \text{ mol H}_2\text{O}}{4 \text{ mol H}} \right) = 0.063 \text{ mol H}_2\text{O}$$

A partir de estos términos fuente sabemos que por cada gramo de aceite se producen 0.07283 mol CO₂ y 0.063 mol H₂O, requiriendo 0.10433 mol O₂ y sabiendo que se requiere un exceso de aire del 10 %, podemos calcular la cantidad de aire requerida para la combustión:

$$0.10433 \text{ mol O}_2 \left(\frac{1.1 \text{ mol de O}_2}{1 \text{ mol O}_2 \text{ requerido}} \right) = 0.114763 \text{ mol O}_2$$

$$0.114763 \text{ mol O}_2 \left(\frac{0.79 \text{ mol N}_2}{0.21 \text{ mol O}_2} \right) = 0.431727 \text{ mol N}_2$$

Por lo que cada gramo de aceite requiere 0.546490 mol de aire, quedando remanente de la reacción 0.431727 mol N₂ y 0.010433 mol O₂.

Al final de la combustión tendríamos una mezcla gaseosa con la siguiente composición química:

$$X_{CO_2} = \left(\frac{0.07283 \text{ mol } CO_2}{0.57799 \text{ mol}} \right) = 0.1260$$

$$X_{H_2O} = \left(\frac{0.063 \text{ mol } H_2O}{0.57799 \text{ mol}} \right) = 0.1090$$

$$X_{O_2} = \left(\frac{0.010433 \text{ mol } O_2}{0.57799 \text{ mol}} \right) = 0.0181$$

$$X_{N_2} = \left(\frac{0.431727 \text{ mol } N_2}{0.57799 \text{ mol}} \right) = 0.7469$$

b) Calcule la masa de aceite requerida para fundir una tonelada métrica de cobre si el sistema se considera adiabático. La temperatura de fusión del cobre es de 1085 °C y su entalpia de fusión es de 3.1 Kcal/mol.

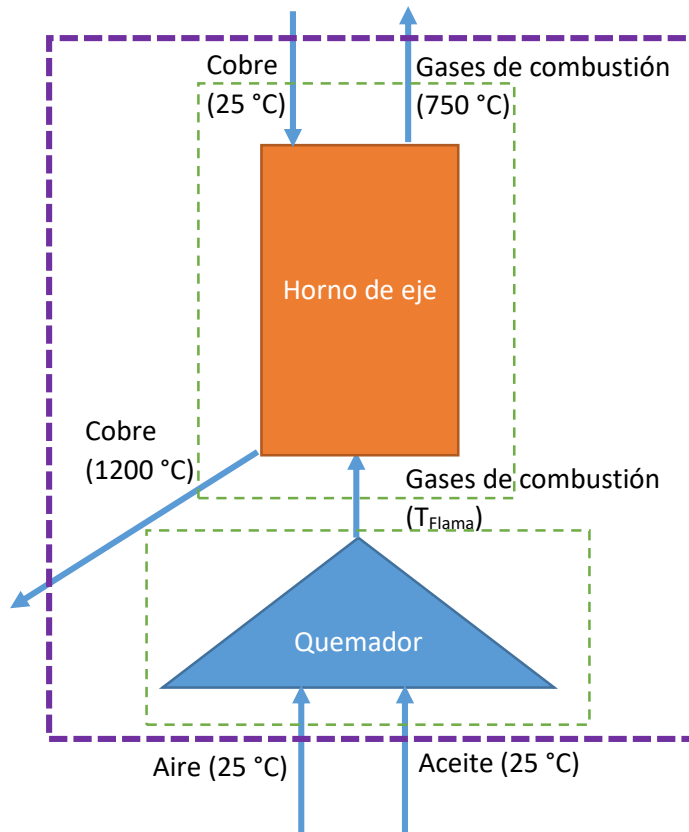


Figura 2.- Esquema del proceso para el balance de energía.

Dadas las características del sistema se puede trabajar el mismo de dos maneras, la primera es dividiendo el sistema en dos partes, el quemador y el horno, como se observa en la definición con fronteras verdes en la Figura 2, o bien, se puede tomar un solo sistema como define con las fronteras moradas en la Figura 2. La ventaja de uno u otro reside en conocer información de la temperatura de flama en contraparte de realizar un cálculo más rápido, al no ser fundamental para nosotros conocer la temperatura de flama podemos trabajar con el sistema completo (fronteras moradas).

Procedemos a plantear el balance de energía térmica:

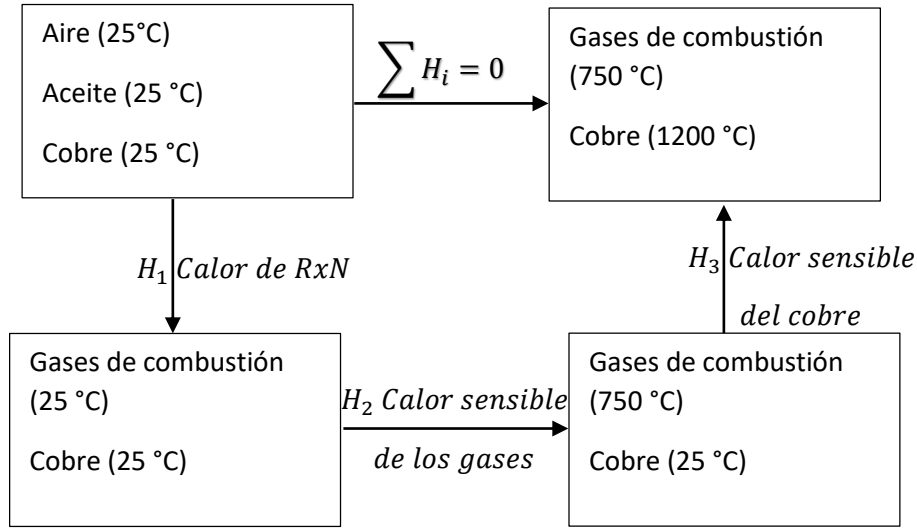


Figura 3.- Planteamiento del balance de energía basado en la ley de Hess.

Procedemos a calcular los aportes de calor para el balance.

H_1 : Calor de RxN

$$H_1 = m_{aceite} \left(4967.50 \frac{\text{cal}}{\text{g de aceite}} \right)$$

H_2 : Calor sensible de los gases productos de la combustión

Comenzamos calculando un Cp de mezcla para dejarlo en función de los moles de gases productos de la combustión.

$$Cp_{GP} = \sum X_i Cp_i$$

$$Cp_{GP} = 7.21478 + 0.001331 T - 25556 T^{-2} \frac{\text{cal}}{\text{molK}}$$

$$H_2 = -n_{GP} \int_{298}^{1023} Cp_{GP} dT$$

$$H_2 = -n_{GP} \int_{298}^{1023} 7.21478 + 0.001331 T - 25556 T^{-2} dT$$

$$H_2 = -n_{GP} (7.21478 T + 0.0006655 T^2 + 25556 T^{-1})$$

$$H_2 = -n_{GP} \left(7.21478 (1023 - 298) + 0.0006655 (1023^2 - 298^2) + 25556 \left(\frac{1}{1023} - \frac{1}{298} \right) \right)$$

$$H_2 = -n_{GP} (5230.7155 + 637.3660 - 60.7770)$$

$$H_2 = -n_{GP} \left(5807.3045 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right)$$

Pero del balance de materia sabemos que por cada gramo de aceite quemado se producen 0.5780 mol de gases producto de la combustión, por lo que:

$$n_{GP} = -m_{aceite} \left(\frac{0.5780 \text{ mol GP}}{1 \text{ g aceite}} \right)$$

$$H_2 = -m_{aceite} \left(\frac{0.5780 \text{ mol GP}}{1 \text{ g aceite}} \right) \left(5807.3045 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right)$$

$$H_2 = -m_{aceite} \left(3356.6220 \frac{\text{cal}}{\text{g aceite}} \right)$$

H₃: Calor de fusión del Cu

$$H_3 = -1 \times 10^6 \text{ g Cu} \left(\frac{1 \text{ mol Cu}}{63.546 \text{ g Cu}} \right) \left(\int_{298}^{1358} (5.41 + 0.0015 T) dT + 3100 + \int_{1358}^{1473} (7.50) dT \right)$$

$$H_3 = -15736.63173 \text{ mol Cu} (5734.6 + 1316.52 + 3100 + 862.5)$$

$$H_3 = -15736.63173 \text{ mol Cu} \left(11013.62 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right)$$

$$H_3 = -173317282 \text{ cal}$$

Finalizamos realizando el balance de energía:

$$H_1 + H_2 + H_3 = 0$$

$$m_{aceite} \left(\frac{4967.50 \text{ cal}}{1 \text{ g de aceite}} \right) - m_{aceite} \left(3356.6220 \frac{\text{cal}}{\text{g aceite}} \right) - 173317282 \text{ cal} = 0$$

$$m_{aceite} \left(1610.878 \frac{\text{cal}}{\text{g de aceite}} \right) - 173317282 \text{ cal} = 0$$

$$m_{aceite} = \frac{173317282 \text{ cal}}{1610.878 \frac{\text{cal}}{\text{g de aceite}}}$$

$$m_{aceite} = 107591.8114 \text{ g aceite}$$

$$m_{aceite} = 107.5918 \text{ Kg aceite}$$

c) Calcule la masa de aceite requerida para fundir una tonelada métrica de cobre si existen pérdidas de calor del 10%.

Para considerar las pérdidas únicamente tendríamos que restar una parte del calor de reacción al balance de energía, ya que es la única fuente energética para el sistema.

H_L: Pérdidas de calor

$$H_L = -m_{aceite} \left(496.75 \frac{\text{cal}}{\text{g de aceite}} \right)$$

Por lo que el nuevo balance queda:

$$H_1 + H_2 + H_3 + H_L = 0$$

$$m_{aceite} \left(\frac{4967.50 \text{ cal}}{1 \text{ g de aceite}} \right) - m_{aceite} \left(3356.6220 \frac{\text{cal}}{\text{g aceite}} \right) - 173317282 \text{ cal}$$

$$- m_{aceite} \left(496.75 \frac{\text{cal}}{\text{g de aceite}} \right) = 0$$

$$m_{aceite} \left(1114.128 \frac{\text{cal}}{\text{g de aceite}} \right) - 173317282 \text{ cal} = 0$$

$$m_{aceite} = \frac{173317282 \text{ cal}}{1114.128 \frac{\text{cal}}{\text{g de aceite}}}$$

$$m_{aceite} = 155563.1687 \text{ g aceite}$$

$$m_{aceite} = 155.5632 \text{ Kg aceite}$$

d) Realice el diagrama de Sankey para el horno de eje, ya sea considerando el sistema adiabático o bien con las pérdidas de calor.

Considerando el balance con pérdidas de calor, podemos tabular el % de entradas o salidas de energía al que corresponde cada fuente de calor.

Tabla 1.- % de entradas y salidas de calor al sistema

Fuente de calor	Calor (cal)	Calor (%)
Entradas		
H ₁ : Calor de RxN	772760196.0	100.00
Total entradas	772760196.0	100.00
Salidas		
H ₂ : Calor sensible de los gases	-522166859.5	67.57
H ₃ : Calor de fusión del Cu	-173317282.0	22.43
H _L : Pérdidas de calor	-77276019.6	10.00
Total salidas	-772760161.1	100.00
Balance		
Suma de entradas y salidas	34.9	≈0

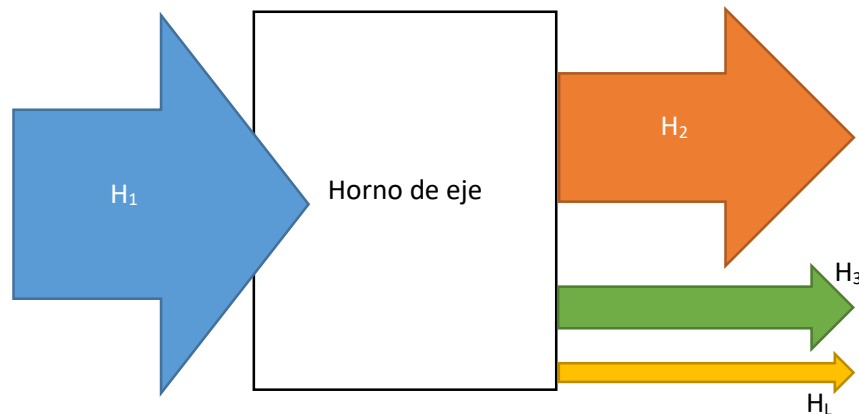


Figura 4.- Diagrama se Sankey considerando el proceso con pérdidas de calor.