

Ejemplo de Balance Macroscópico de Energía Térmica (Producción de ferrita de níquel)

La técnica de tostación por rociado es un proceso en donde una solución es proyectada con un gas caliente para producir un polvo con una composición química controlada. En este caso una solución de acetato de hierro ($\text{Fe}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_3$) con acetato de níquel ($\text{Ni}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$) es sometida a un proceso de tostación por rociado para producir ferrita de níquel (NiFe_2O_4). Esta ferrita de níquel se sinteriza en una operación posterior para producir partes cerámicas. La mezcla de acetatos se encuentra en solución acuosa. Se debe mantener la temperatura del horno de tostación a $475\text{ }^\circ\text{C}$ con una atmósfera que mantenga la fracción volumen de O_2 en 5%. Las pérdidas de calor son de 6000 kJ por kilogramo de solución acuosa (mezcla de acetatos) procesada. Considere que el proceso se lleva a cabo con aire como gas para la tostación. Un esquema básico del proceso se presenta en la Figura 1.

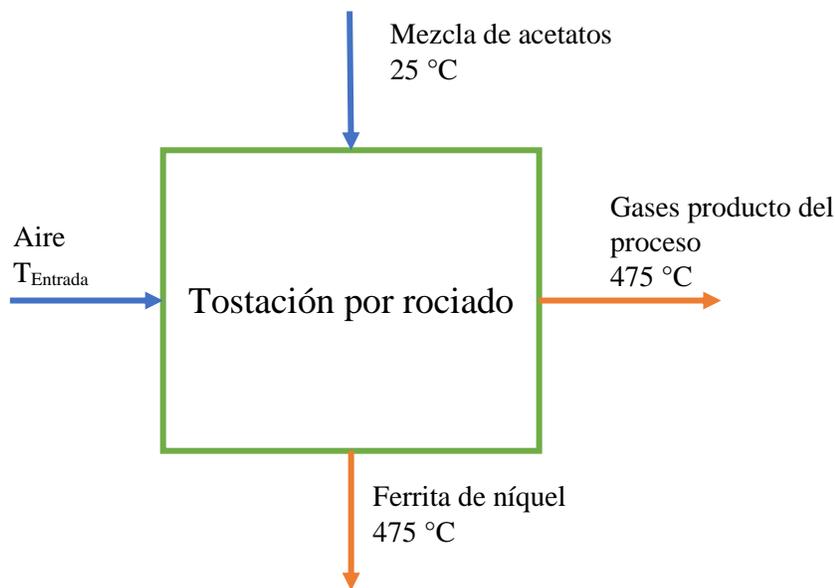
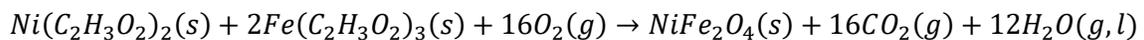


Figura 1.- Esquema general del proceso de tostación por rociado para producir ferrita de níquel.

La oxidación de los acetatos es una reacción de dos pasos, la primera es que el acetato debe separarse de la solución y la segunda es la reacción de oxidación. El primer paso se puede despreciar ya que el calor requerido para ello es muy pequeño. El segundo paso es la siguiente reacción:



Cuyo calor de reacción a temperatura ambiente es de -9660 kJ/kg de mezcla de acetatos que participa en la reacción, es decir, lo que existe sin considerar el agua.

Los datos para la entalpía sensible de los componentes del sistema se presentan en la Tabla 1. Nótese que, para el caso del agua la ecuación considera la entalpía de cambio de fase.

Tabla 1.- Cambio de entalpía de los componentes del proceso de tostación por proyección.

$$H_T - H_{25^\circ C} \left(\frac{kJ}{mol} \right) = AT + B$$

Componente	CO ₂ (g)	H ₂ O (l,g)	N ₂ (g)	O ₂ (g)	Aire	NiFe ₂ O ₄
A	0.0465	0.0371	0.0321	0.0327	0.0324	0.196
B	-1.88	42.53	-1.25	-1.20	-1.26	-10.77

Las masas molares de los elementos que participan en el proceso se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.- Masas molares de los elementos que participan en el proceso.

Elemento	Masa molar (g/mol)
Ni	58.6934
Fe	55.8450
C	12.0107
H	1.00794
O	15.9994
N	14.0067

Se desea procesar cada minuto una mezcla de acetatos que contiene 1.556 mol de acetato de níquel y 3.112 mol de acetato de hierro (manteniendo la relación estequiométrica de reacción), además de 360 gramos de agua.

Responda.

- ¿Cuál es el flujo de aire requerido por el proceso?
- ¿Cuál es el flujo y composición química de los gases producidos tras la tostación por rociado?
- Realice un esquema del proceso con todos los flujos y composiciones químicas de las corrientes en el mismo.
- ¿Cuál es la temperatura a la que debe ingresar el aire al proceso para que se lleve a cabo el mismo en las condiciones deseadas?
- Esquematice el diagrama de Sankey del proceso.

Como referencia, la Figura 2 presenta un esquema de un tostador por rociado.

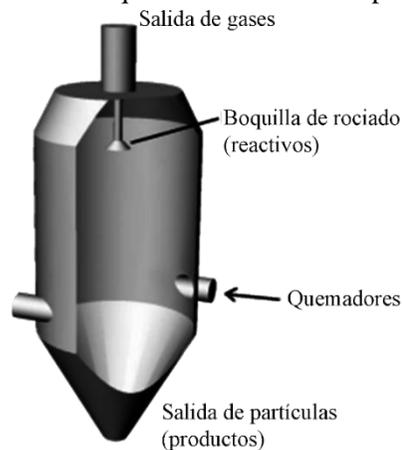


Figura 2.- Esquema de un tostador por rociado.

Solución:

Comencemos planteando un esquema general del proceso con todos los datos que conocemos en el mismo (ver Figura 3). En este caso se colocarán los datos para realizar el balance mediante flujos molares.

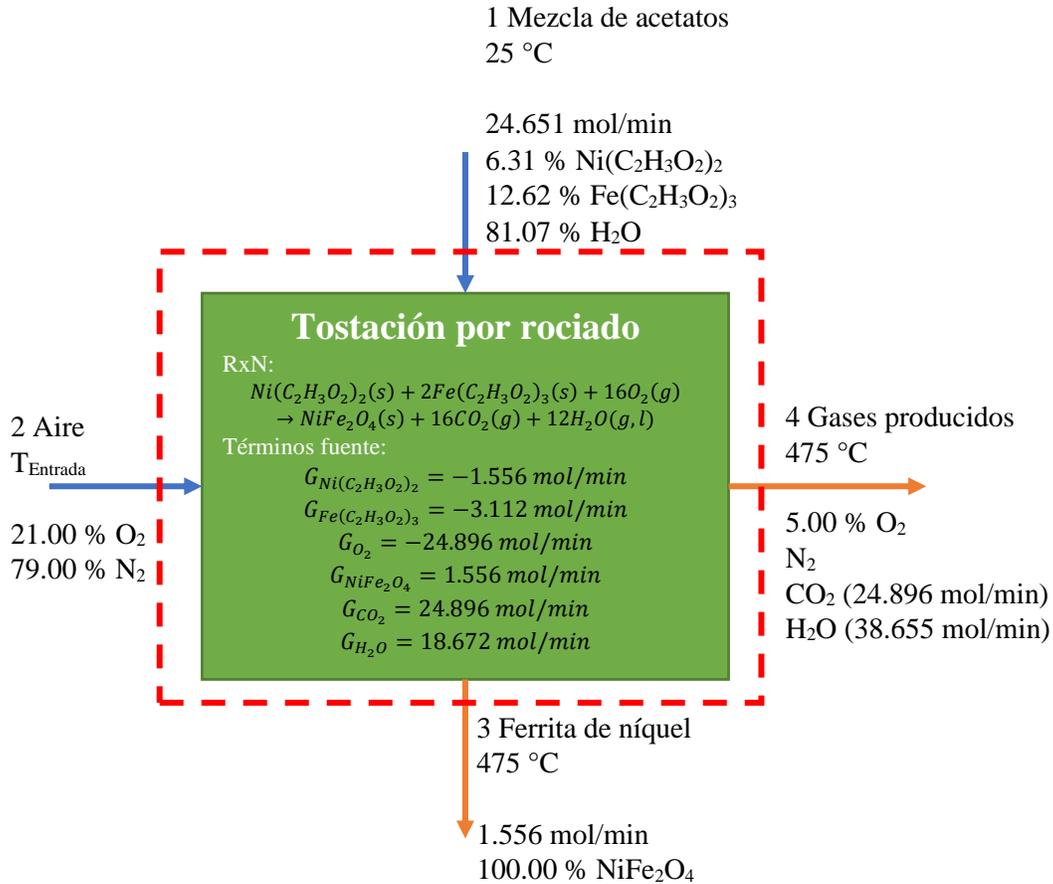


Figura 3.- Datos conocidos del proceso de producción de ferrita de níquel mediante tostación por rociado.

Dados los datos con que contamos, es posible visualizar que salvo el O₂ y el N₂ los demás componentes del sistema tienen su balance prácticamente completo ya que conocemos entradas, salidas y términos fuente de los mismos. Por lo que solo analizaremos las ecuaciones para el O₂ y el N₂, que son:

$$\dot{n}_{O_2,4} = 0.05\dot{n}_4 = \dot{n}_{O_2,2} - 24.896 \frac{mol}{min}$$

$$\dot{n}_{N_2,4} = \dot{n}_{N_2,2}$$

Además, sabemos que:

$$\dot{n}_{N_2,2} = \frac{0.79}{0.21} \dot{n}_{O_2,2}$$

Y que:

$$\dot{n}_4 = \dot{n}_{O_2,4} + \dot{n}_{N_2,4} + \dot{n}_{H_2O,4} + \dot{n}_{CO_2,4}$$

$$\dot{n}_4 = \dot{n}_{O_2,2} - 24.896 \frac{mol}{min} + \frac{0.79}{0.21} \dot{n}_{O_2,2} + 38.655 \frac{mol}{min} + 24.896 \frac{mol}{min}$$

Por lo que:

$$\begin{aligned}\dot{n}_4 &= \frac{\dot{n}_{O_2,2} - 24.896 \frac{\text{mol}}{\text{min}}}{0.05} \\ \dot{n}_{O_2,2} + \frac{0.79}{0.21} \dot{n}_{O_2,2} + 38.655 \frac{\text{mol}}{\text{min}} &= \frac{\dot{n}_{O_2,2} - 24.896 \frac{\text{mol}}{\text{min}}}{0.05} \\ \dot{n}_{O_2,2} + 3.7619 \dot{n}_{O_2,2} + 38.655 \frac{\text{mol}}{\text{min}} &= 20 \dot{n}_{O_2,2} - 497.92 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \\ 15.2381 \dot{n}_{O_2,2} &= 536.5750 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \\ \dot{n}_{O_2,2} &= 35.2127 \frac{\text{mol}}{\text{min}}\end{aligned}$$

De ahí podemos conocer que:

$$\begin{aligned}\dot{n}_{N_2,2} = \dot{n}_{N_2,4} &= 132.4670 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \\ \dot{n}_{O_2,4} &= 10.3167 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \\ \dot{n}_2 &= 167.6797 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \\ \dot{n}_4 &= 206.3347 \frac{\text{mol}}{\text{min}}\end{aligned}$$

Con lo que el balance de materia queda completo.

La Figura 4 presenta el esquema del proceso con todos los flujos molares conocidos. De la misma manera, solo por referencia, la Figura 5 presenta los resultados, pero en flujos másicos.

Los porcentajes molares y volumen se calcularon con la definición de los mismos:

$$\begin{aligned}\% \text{ mol} &= 100\% \left(\frac{\dot{n}_i}{\dot{n}_{Total}} \right) \\ \% \text{ masa} &= 100\% \left(\frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{Total}} \right)\end{aligned}$$

Ahora bien, para corroborar los balances se pueden emplear las ecuaciones de balance general, en el caso del molar es:

$$\dot{n}_1 + \dot{n}_2 - \dot{n}_3 - \dot{n}_4 + G_{Ni(C_2H_3O_2)_2} + G_{Fe(C_2H_3O_2)_3} + G_{O_2} + G_{NiFe_2O_4} + G_{CO_2} + G_{H_2O} = 0$$

Recordemos que se deben incluir los términos fuente, ya que el número de moles en la estequiometria de reacción no es necesariamente igual entre reactivos y productos.

$$\begin{aligned}24.651 \frac{\text{mol}}{\text{min}} + 167.680 \frac{\text{mol}}{\text{min}} - 1.556 \frac{\text{mol}}{\text{min}} - 206.335 \frac{\text{mol}}{\text{min}} - 1.556 \frac{\text{mol}}{\text{min}} - 3.112 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \\ - 24.896 \frac{\text{mol}}{\text{min}} + 1.556 \frac{\text{mol}}{\text{min}} + 24.896 \frac{\text{mol}}{\text{min}} + 18.672 \frac{\text{mol}}{\text{min}} = 0\end{aligned}$$

$$0 = 0$$

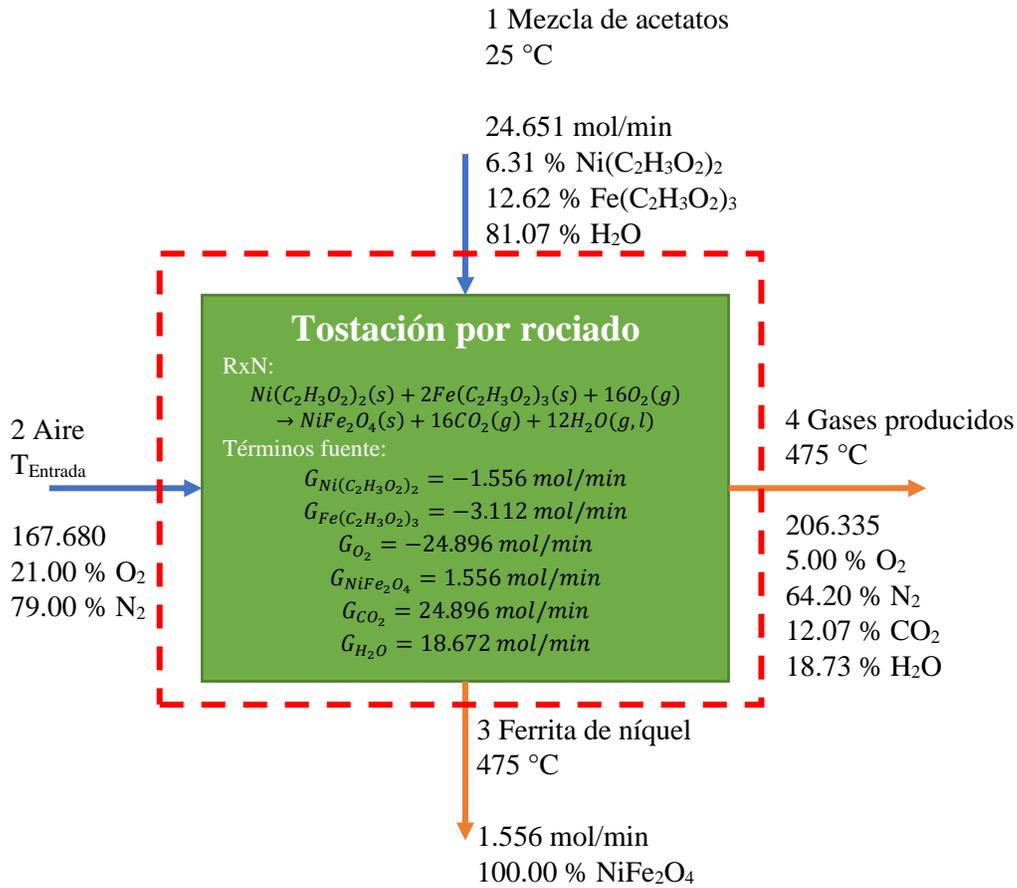


Figura 4.- Resultados del balance molar.

En el caso del balance de materia la ecuación es:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_4 = 0$$

$$1360.10 \frac{\text{g}}{\text{min}} + 4837.62 \frac{\text{g}}{\text{min}} - 364.70 \frac{\text{g}}{\text{min}} - 5833.02 \frac{\text{g}}{\text{min}} = 0$$

$$0 = 0$$

En este caso no se incluyen los términos fuente ya que la masa de productos y reactivos debe ser la misma (salvo en reacciones nucleares) y por lo tanto se cancelan.

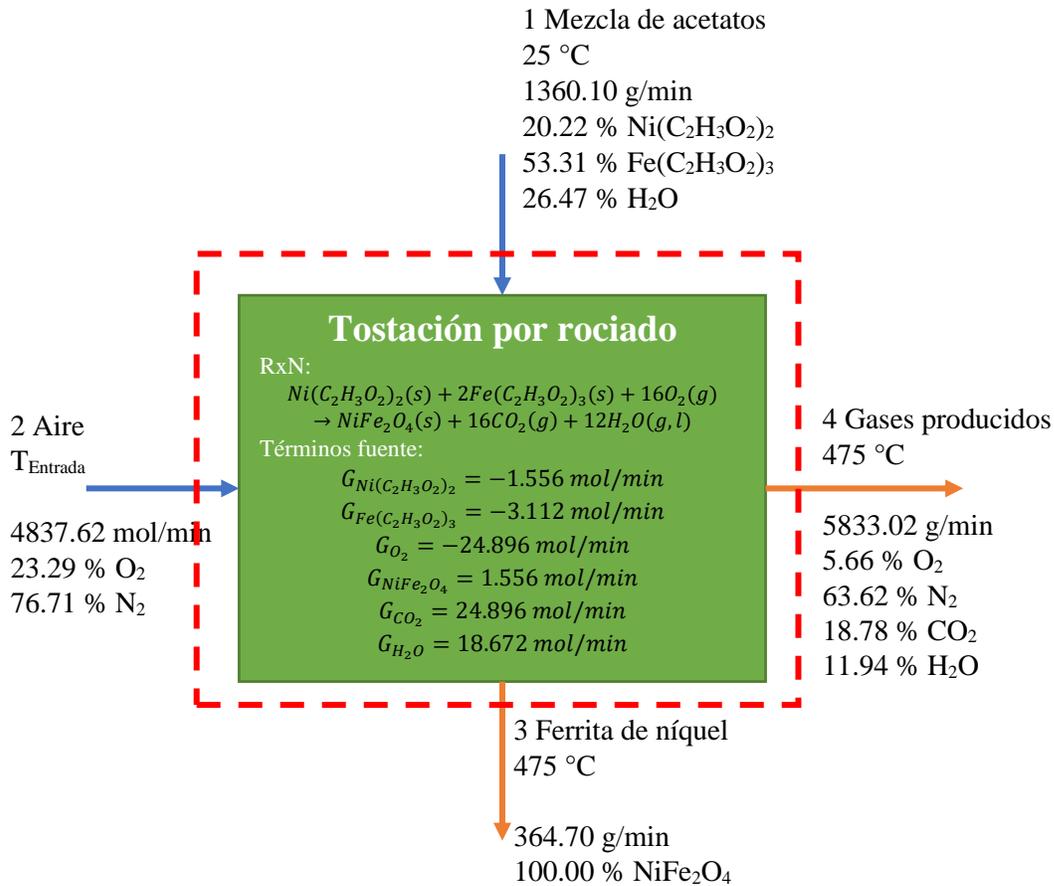


Figura 5.- Resultados del balance másico.

Una vez terminado el balance de materia podemos pasar al balance de energía, el cual está planteado en la Figura 6.

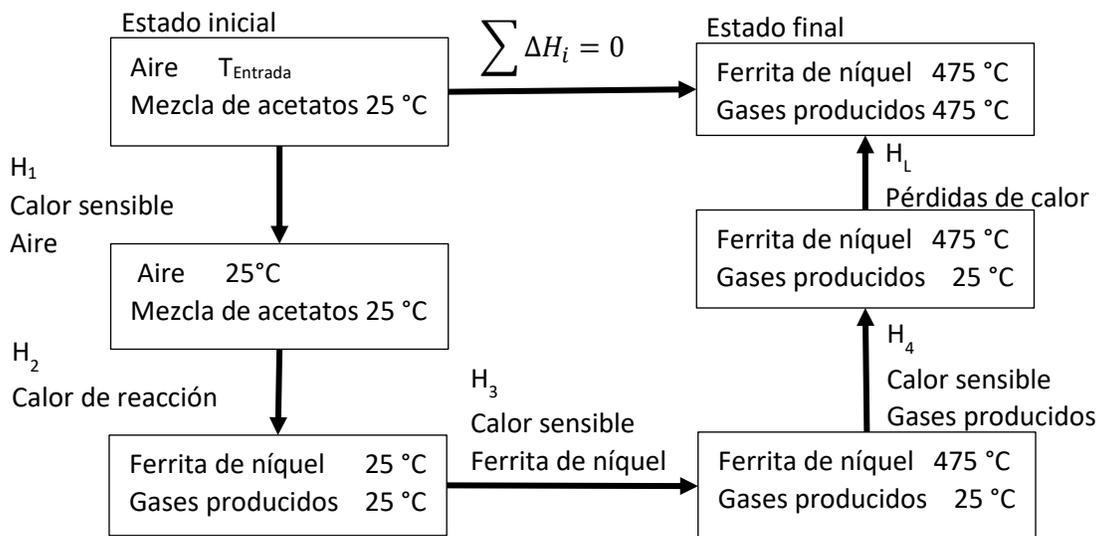


Figura 6.- Planteamiento del balance de calor.

Procedemos a calcular los calores requeridos para el balance.

H₁: (Positivo por ser entrada)

$$H_1 = \dot{n}_2 \left(H_{T_{Entrada}} - H_{25^\circ C} \left(\frac{kJ}{mol} \right) \right) = \dot{n}_2 (AT + B)$$

$$H_1 = 167.6797 \frac{mol}{min} \left(0.0324 T_{Entrada} - 1.26 \frac{kJ}{mol} \right)$$

$$H_1 = 5.4328 T_{Entrada} - 211.2764 \frac{kJ}{min}$$

H₂: (Positivo por ser entrada)

$$H_2 = -\dot{m}_1 (\Delta H_{Rxn})$$

$$H_2 = -1.00 \frac{kg}{min} \left(-9660.00 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$H_2 = 9660.00 \frac{kJ}{min}$$

H₃: (Negativo por ser salida)

$$H_3 = -\dot{n}_3 \left(H_{475^\circ C} - H_{25^\circ C} \left(\frac{kJ}{mol} \right) \right)$$

$$H_3 = -1.556 \frac{mol}{min} \left(0.196 (475) - 10.77 \frac{kJ}{mol} \right)$$

$$H_3 = -128.1055 \frac{kJ}{min}$$

H₄: (Negativo por ser salida)

$$H_4 = - \sum \left[\dot{n}_{i,4} \left(H_{i,475^\circ C} - H_{i,25^\circ C} \left(\frac{kJ}{mol} \right) \right) \right]$$

$$H_4 = -10.317 \frac{mol}{min} \left(0.0327 (475) - 1.2 \frac{kJ}{mol} \right) - 132.467 \frac{mol}{min} \left(0.0321 (475) - 1.25 \frac{kJ}{mol} \right)$$

$$- 24.896 \frac{mol}{min} \left(0.0465 (475) - 1.88 \frac{kJ}{mol} \right)$$

$$- 38.655 \frac{mol}{min} \left(0.0371 (475) + 42.53 \frac{kJ}{mol} \right)$$

$$H_4 = -4830.3539 \frac{kJ}{min}$$

H_L: (Negativo por ser salida)

$$H_L = -\dot{m}_1 (\Delta H_{Pérdidas})$$

$$H_L = -1.36 \frac{kg}{min} \left(6000.00 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$H_L = -8160.5792 \frac{kJ}{min}$$

El balance de energía queda:

$$H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_L = 0$$

$$5.4328 T_{Entrada} - 211.2764 \frac{kJ}{min} + 9660.00 \frac{kJ}{min} - 128.1055 \frac{kJ}{min} - 4830.3539 \frac{kJ}{min} - 8160.5792 \frac{kJ}{min} = 0$$

De donde:

$$5.4328 T_{Entrada} - 3669.3825 \frac{kJ}{min} = 0$$

$$5.4328 T_{Entrada} = 3669.3825$$

$$T_{Entrada} = \frac{3669.3825}{5.4328}$$

$$T_{Entrada} = 675.41 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Que es la temperatura a la que debe ingresar el aire para llevar a cabo la reacción.

Los datos para trazar el diagrama de Sankey se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.- Flujos de calor que participan en el proceso de tostación por rociado.

Fuente de calor	Calor (kJ/min)	Calor (%)
Entradas		
H ₁	3458.11	26.36
H ₂	9660.93	73.64
Total	13119.04	100.00
Salidas		
H ₃	-128.11	0.98
H ₄	-4830.35	36.82
H _L	-8160.58	62.20
Total	-13119.04	100.00
Balance	0.00	----

El diagrama de Sankey del proceso se presenta en la Figura 6.

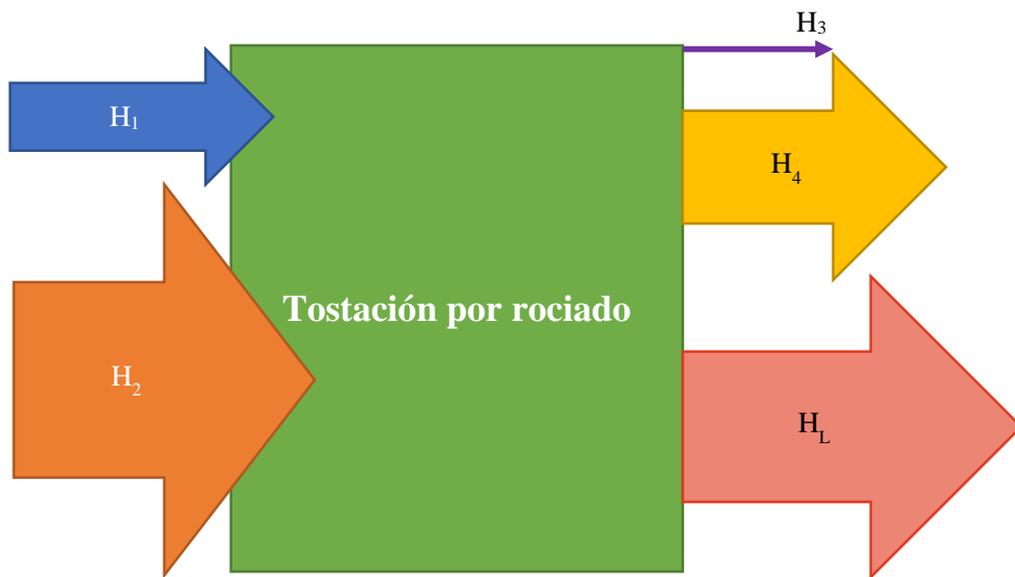


Figura 6.- Diagrama de Sankey.