

Ejemplo de balance macroscópico de materia Recuperación de tungsteno

Se procesa un concentrado de tungsteno que contiene 85.2% scheelita (CaWO_4) siendo el resto yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. El concentrado se somete a un proceso de tostación a 660°C , para lo que se adiciona una determinada cantidad de carbonato de sodio (Na_2CO_3) para convertir la scheelita en un tungstato de sodio (Na_2WO_4) que es soluble en agua. El concentrado producto de la tostación es sometido a una lixiviación con agua para disolver todo el tungstato de sodio. La Figura 1 muestra un esquema del proceso descrito.

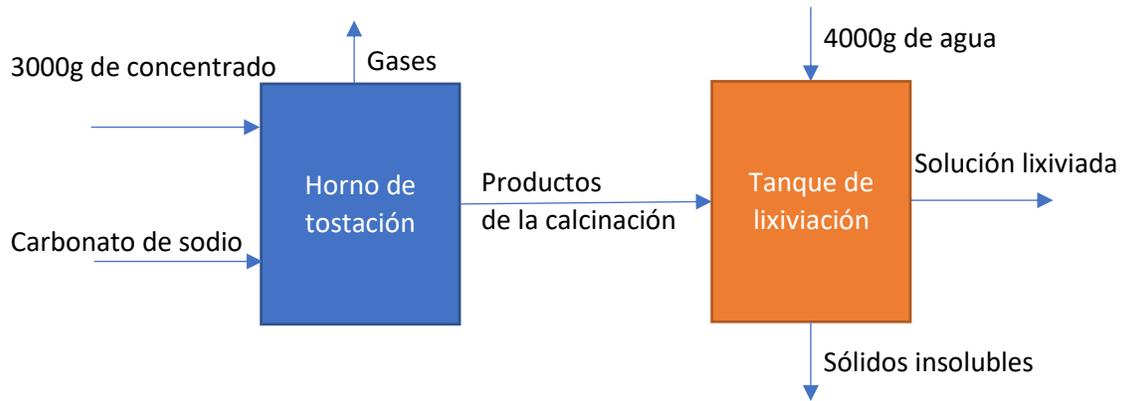
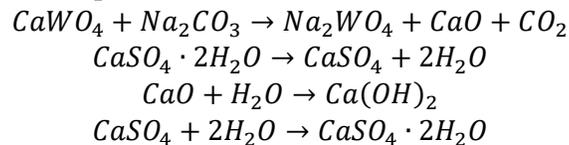


Figura 1.- Esquema del proceso de recuperación de tungsteno.

Se llevan a cabo cuatro reacciones químicas en el proceso. Las primeras dos en el horno de tostación, mientras que las segundas dos en el tanque de lixiviación. La primera reacción no se lleva a cabo completamente, mientras que las otras tres sí.



Se llevaron a cabo cinco pruebas en laboratorio usando diferentes masas de Na_2CO_3 para determinar la eficacia de disolución del Na_2WO_4 . Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.- Resultados de las pruebas de laboratorio.

Masa de Na_2CO_3 agregada (g)	660	940	1320	1645	1980
$W_{\text{Na}_2\text{WO}_4}$ en la solución	0.2238	0.3021	0.2975	0.2960	0.2911

Resuelva el balance de materia para cada uno de las pruebas de laboratorio, con la finalidad de obtener las siguientes gráficas:

- El porcentaje estequiométrico de Na_2CO_3 agregado contra la masa de Na_2CO_3 adicionada.
- La eficiencia de reacción para producir Na_2WO_4 contra la masa de Na_2CO_3 adicionada.
- La fracción masa de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ producida tras la lixiviación contra la masa de Na_2CO_3 adicionada.
- El volumen de gases de salida (660°C y 0.95 atm) producidos contra la masa de Na_2CO_3 adicionada.
- La masa de solución lixiviada producida contra la masa de Na_2CO_3 adicionada.

Considere que el $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ es completamente insoluble y que tanto el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como el Na_2CO_3 son completamente solubles.

Primeramente, definamos el sistema con el que se trabajará:

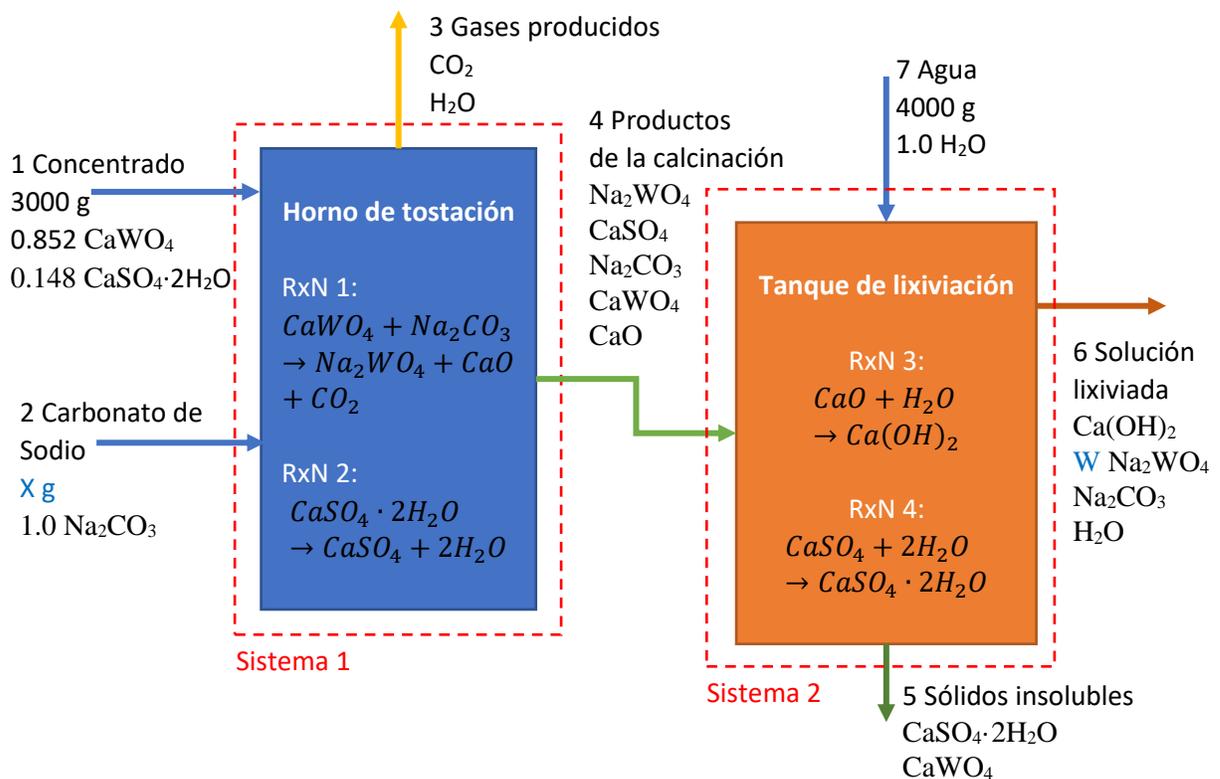


Figura 2.- Esquema del proceso de recuperación de tungsteno.

Una vez puestos los datos conocidos en el esquema, verificamos si podemos obtener información adicional del proceso mediante estequiometría. En este caso, comenzaremos por calcular la cantidad estequiométrica de Na_2CO_3 que se agrega al proceso.

$$n_{\text{CaWO}_4} = 3000 \text{ g conc} \left(\frac{85.2 \text{ g CaWO}_4}{100 \text{ g conc}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol CaWO}_4}{287.93 \text{ g CaWO}_4} \right) = 8.87 \text{ mol CaWO}_4$$

$$n_{Na_2CO_3} = X \text{ g } Na_2CO_3 \left(\frac{1 \text{ mol } Na_2CO_3}{105.98 \text{ g } Na_2CO_3} \right) = n \text{ mol } Na_2CO_3$$

$$\% \text{ Estequiométrico} = \frac{n \text{ mol } Na_2CO_3}{8.87 \text{ mol } CaWO_4} 100\%$$

Tabla 2.- Porcentaje estequiométrico de Na_2CO_3 agregado.

Masa de Na_2CO_3 agregada (g)	660	940	1320	1645	1980
Moles de Na_2CO_3 (mol)	6.23	8.87	12.45	15.52	18.68
% Estequiométrico	70.21	100.00	140.41	174.99	210.62

Con estos resultados, podemos obtener la gráfica que se solicita en el inciso (a) del problema:

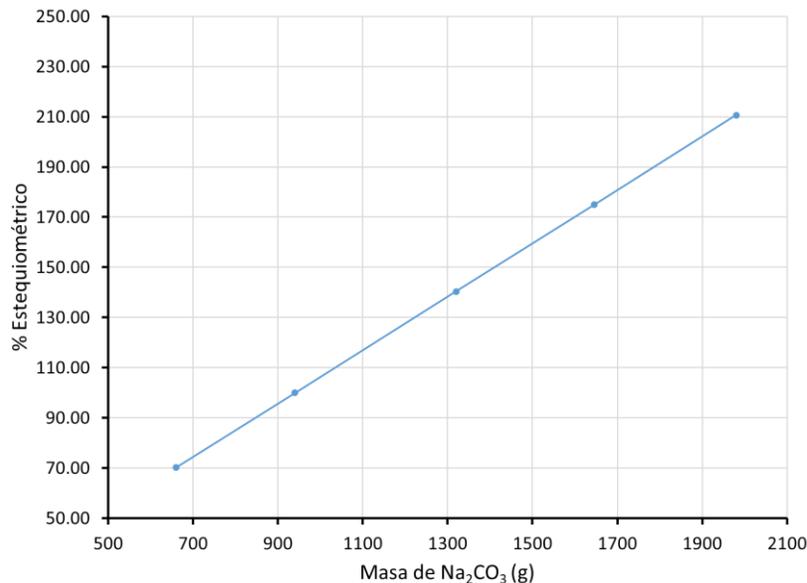


Figura 3.- Porcentaje estequiométrico contra la masa de Na_2CO_3 agregada.

También, dada la naturaleza del proceso podemos calcular los términos fuente en los que participa el $CaSO_4$, ya que no reacciona más que con el agua (para hidratarse o deshidratarse) y sabemos su masa inicial:

$$G_{CaSO_4 \cdot 2H_2O, RxN 2} = -3000 \text{ g conc} \left(\frac{14.8 \text{ g } CaSO_4 \cdot 2H_2O}{100 \text{ g conc}} \right) = -444 \text{ g } CaSO_4 \cdot 2H_2O$$

$$G_{CaSO_4, RxN 2} = 444 \text{ g } CaSO_4 \cdot 2H_2O \left(\frac{1 \text{ mol } CaSO_4 \cdot 2H_2O}{172.44 \text{ g } CaSO_4 \cdot 2H_2O} \right) \left(\frac{1 \text{ mol } CaSO_4}{1 \text{ mol } CaSO_4 \cdot 2H_2O} \right) \left(\frac{136.44 \text{ g } CaSO_4}{1 \text{ mol } CaSO_4} \right)$$

$$G_{CaSO_4, RxN 2} = 351.79 \text{ g } CaSO_4$$

$$G_{H_2O, RxN 2} = 444 \text{ g } CaSO_4 \cdot 2H_2O \left(\frac{1 \text{ mol } CaSO_4 \cdot 2H_2O}{172.44 \text{ g } CaSO_4 \cdot 2H_2O} \right) \left(\frac{2 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } CaSO_4 \cdot 2H_2O} \right) \left(\frac{18 \text{ g } H_2O}{1 \text{ mol } H_2O} \right)$$

$$G_{H_2O, RxN 2} = 92.69 \text{ g } H_2O$$

$$G_{CaSO_4, RxN 4} = -351.79 \text{ g } CaSO_4$$

$$G_{H_2O, RxN 4} = -96.69 \text{ g } H_2O$$

$$G_{CaSO_4 \cdot 2H_2O, RxN 4} = 444 \text{ g } CaSO_4 \cdot 2H_2O$$

Procedemos a hacer los balances de materia para el sistema 1:

General:

$$\begin{aligned}E - S &= 0 \\m_1 + m_2 - m_3 - m_4 &= 0 \\3000 \text{ g} + X \text{ g} - m_3 - m_4 &= 0\end{aligned}$$

CaWO₄:

$$\begin{aligned}E - S + G &= 0 \\m_{CaWO_4,1} - m_{CaWO_4,4} + G_{CaWO_4,RxN 1} &= 0 \\W_{CaWO_4,1}m_1 - W_{CaWO_4,4}m_4 + G_{CaWO_4,RxN 1} &= 0 \\0.852(3000 \text{ g}) - W_{CaWO_4,4}m_4 + G_{CaWO_4,RxN 1} &= 0 \\-W_{CaWO_4,4}m_4 + G_{CaWO_4,RxN 1} &= -2556 \text{ g CaWO}_4\end{aligned}$$

CaSO₄·2H₂O:

$$\begin{aligned}E + G &= 0 \\m_{CaSO_4 \cdot 2H_2O,1} + G_{CaSO_4 \cdot 2H_2O,RxN 2} &= 0 \\W_{CaSO_4 \cdot 2H_2O,1}m_1 + G_{CaSO_4 \cdot 2H_2O,RxN 2} &= 0 \\0.148(3000 \text{ g}) + G_{CaSO_4 \cdot 2H_2O,RxN 2} &= 0 \\G_{CaSO_4 \cdot 2H_2O,RxN 2} &= -444 \text{ g CaSO}_4 \cdot 2H_2O\end{aligned}$$

Na₂CO₃:

$$\begin{aligned}E - S + G &= 0 \\m_{Na_2CO_3,2} - m_{Na_2CO_3,4} + G_{Na_2CO_3,RxN 1} &= 0 \\X \text{ g} - m_{Na_2CO_3,4} + G_{Na_2CO_3,RxN 1} &= 0\end{aligned}$$

CO₂:

$$\begin{aligned}-S + G &= 0 \\-m_{CO_2,3} + G_{CO_2,RxN 1} &= 0\end{aligned}$$

H₂O:

$$\begin{aligned}-S + G &= 0 \\-m_{H_2O,3} + G_{H_2O,RxN 2} &= 0 \\-m_{H_2O,3} + 92.69 \text{ g H}_2O &= 0 \\m_{H_2O,3} &= 92.69 \text{ g H}_2O\end{aligned}$$

Na₂WO₄:

$$\begin{aligned}-S + G &= 0 \\-m_{Na_2WO_4,4} + G_{Na_2WO_4,RxN 1} &= 0\end{aligned}$$

CaSO₄:

$$\begin{aligned}-S + G &= 0 \\-m_{CaSO_4,4} + G_{CaSO_4,RxN 2} &= 0 \\-m_{CaSO_4,4} + 351.79 \text{ g CaSO}_4 &= 0 \\m_{CaSO_4,4} &= 351.79 \text{ g CaSO}_4\end{aligned}$$

CaO:

$$\begin{aligned} -S + G &= 0 \\ -m_{CaO,4} + G_{CaO,RxN 1} &= 0 \end{aligned}$$

Para el sistema 2:

General:

$$\begin{aligned} E - S &= 0 \\ m_4 + m_7 - m_5 - m_6 &= 0 \\ m_4 + 4000 \text{ g} - m_5 - m_6 &= 0 \end{aligned}$$

CaWO₄:

$$\begin{aligned} E - S &= 0 \\ m_{CaWO_4,4} - m_{CaWO_4,5} &= 0 \end{aligned}$$

CaSO₄·2H₂O:

$$\begin{aligned} -S + G &= 0 \\ -m_{CaSO_4 \cdot 2H_2O,5} + G_{CaSO_4 \cdot 2H_2O,RxN 4} &= 0 \\ -m_{CaSO_4 \cdot 2H_2O,5} + 444 \text{ g CaSO}_4 \cdot 2H_2O &= 0 \\ m_{CaSO_4 \cdot 2H_2O,5} &= 444 \text{ g CaSO}_4 \cdot 2H_2O \end{aligned}$$

Na₂CO₃:

$$\begin{aligned} E - S &= 0 \\ m_{Na_2CO_3,4} - m_{Na_2CO_3,6} &= 0 \end{aligned}$$

H₂O:

$$\begin{aligned} E - S + G &= 0 \\ m_{H_2O,7} - m_{H_2O,6} + G_{H_2O,RxN 3} + G_{H_2O,RxN 4} &= 0 \\ 4000 \text{ g} - W_{H_2O,6}m_6 + G_{H_2O,RxN 3} - 96.69 \text{ g} &= 0 \\ -W_{H_2O,6}m_6 + G_{H_2O,RxN 3} &= -3903.31 \text{ g H}_2O \end{aligned}$$

Na₂WO₄:

$$\begin{aligned} E - S &= 0 \\ m_{Na_2WO_4,4} - m_{Na_2WO_4,6} &= 0 \\ m_{Na_2WO_4,4} - W_{Na_2WO_4,6}m_6 &= 0 \\ m_{Na_2WO_4,4} - (W)m_6 &= 0 \end{aligned}$$

CaSO₄:

$$\begin{aligned} E + G &= 0 \\ m_{CaSO_4,4} + G_{CaSO_4,RxN 4} &= 0 \\ m_{CaSO_4,4} - 351.79 \text{ g CaSO}_4 &= 0 \\ m_{CaSO_4,4} &= 351.79 \text{ g CaSO}_4 \end{aligned}$$

CaO:

$$\begin{aligned} E + G &= 0 \\ m_{CaO,4} + G_{CaO,RxN 3} &= 0 \end{aligned}$$

Ca(OH)₂:

$$-S + G = 0$$

$$-m_{Ca(OH)_2,6} + G_{Ca(OH)_2,RxN 3} = 0$$

Quedándonos el siguiente juego de ecuaciones:

$$3000 g + X g - m_3 - m_4 = 0$$

$$-W_{CaWO_4,4}m_4 + G_{CaWO_4,RxN 1} = -2556 g CaWO_4$$

$$X g - m_{Na_2CO_3,4} + G_{Na_2CO_3,RxN 1} = 0$$

$$-m_{CO_2,3} + G_{CO_2,RxN 1} = 0$$

$$-m_{Na_2WO_4,4} + G_{Na_2WO_4,RxN 1} = 0$$

$$-m_{CaO,4} + G_{CaO,RxN 1} = 0$$

$$m_4 + 4000 g - m_5 - m_6 = 0$$

$$m_{CaWO_4,4} - m_{CaWO_4,5} = 0$$

$$m_{Na_2CO_3,4} - m_{Na_2CO_3,6} = 0$$

$$-W_{H_2O,6}m_6 + G_{H_2O,RxN 3} = -3903.31 g H_2O$$

$$m_{Na_2WO_4,4} - (W)m_6 = 0$$

$$m_{CaO,4} + G_{CaO,RxN 3} = 0$$

$$-m_{Ca(OH)_2,6} + G_{Ca(OH)_2,RxN 3} = 0$$

Pero, los términos fuente se pueden relacionar, y las ecuaciones con una misma incógnita, se pueden relacionar, comencemos por simplificar aquellas ecuaciones que comparten masas en una corriente en específico:

$$3000 g + X g - m_3 + 4000 g - m_5 - m_6 = 0$$

$$-m_{CaWO_4,5} + G_{CaWO_4,RxN 1} = -2556 g CaWO_4$$

$$X g - m_{Na_2CO_3,6} + G_{Na_2CO_3,RxN 1} = 0$$

$$-m_{CO_2,3} + G_{CO_2,RxN 1} = 0$$

$$-(W)m_6 + G_{Na_2WO_4,RxN 1} = 0$$

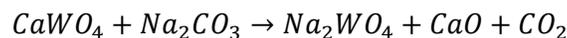
$$G_{CaO,RxN 3} + G_{CaO,RxN 1} = 0$$

$$-W_{H_2O,6}m_6 + G_{H_2O,RxN 3} = -3903.31 g H_2O$$

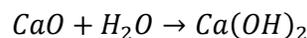
$$-m_{Ca(OH)_2,6} + G_{Ca(OH)_2,RxN 3} = 0$$

Para relacionar los términos fuente tenemos que usar la estequiometría de reacción, en este caso lo ideal es dejar todo en términos de la cantidad de Na₂CO₃ (G_{Na₂CO₃}) que reacciona:

RxN 1:



RxN 3:



Para la reacción 1:

$$G_{CaWO_4,RxN 1} = G_{Na_2CO_3,RxN 1} \left(\frac{1 \text{ mol } Na_2CO_3}{105.98 \text{ g } Na_2CO_3} \right) \left(\frac{1 \text{ mol } CaWO_4}{1 \text{ mol } Na_2CO_3} \right) \left(\frac{287.93 \text{ g } CaWO_4}{1 \text{ mol } CaWO_4} \right)$$

$$G_{CaWO_4,RxN 1} = 2.7168 G_{Na_2CO_3,RxN 1}$$

$$G_{Na_2WO_4,RxN 1} = -G_{Na_2CO_3,RxN 1} \left(\frac{1 \text{ mol } Na_2CO_3}{105.98 \text{ g } Na_2CO_3} \right) \left(\frac{1 \text{ mol } Na_2WO_4}{1 \text{ mol } Na_2CO_3} \right) \left(\frac{293.82 \text{ g } Na_2WO_4}{1 \text{ mol } Na_2WO_4} \right)$$

$$G_{Na_2WO_4,RxN 1} = -2.7724 G_{Na_2CO_3,RxN 1}$$

$$G_{CaO,RxN 1} = -G_{Na_2CO_3,RxN 1} \left(\frac{1 \text{ mol } Na_2CO_3}{105.98 \text{ g } Na_2CO_3} \right) \left(\frac{1 \text{ mol } CaO}{1 \text{ mol } Na_2CO_3} \right) \left(\frac{56.07 \text{ g } CaO}{1 \text{ mol } CaO} \right)$$

$$G_{CaO,RxN 1} = -0.5291 G_{Na_2CO_3,RxN 1}$$

$$G_{CO_2,RxN 1} = -G_{Na_2CO_3,RxN 1} \left(\frac{1 \text{ mol } Na_2CO_3}{105.98 \text{ g } Na_2CO_3} \right) \left(\frac{1 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } Na_2CO_3} \right) \left(\frac{44.01 \text{ g } CO_2}{1 \text{ mol } CO_2} \right)$$

$$G_{CO_2,RxN 1} = -0.4152 G_{Na_2CO_3,RxN 1}$$

En el caso de la reacción 3, también podemos relacionar los términos estequiométricos de la misma con la cantidad que reacciona de Na_2CO_3 ($G_{Na_2CO_3}$), ya que la ecuación siguiente relaciona ambas reacciones:

$$G_{CaO,RxN 3} + G_{CaO,RxN 1} = 0$$

$$G_{CaO,RxN 3} = -G_{CaO,RxN 1}$$

Para la reacción 3:

$$G_{CaO,RxN 3} = 0.5291 G_{Na_2CO_3,RxN 1}$$

$$G_{H_2O,RxN 3} = G_{CaO,RxN 3} \left(\frac{1 \text{ mol } CaO}{56.07 \text{ g } CaO} \right) \left(\frac{1 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } CaO} \right) \left(\frac{18.0152 \text{ g } H_2O}{1 \text{ mol } H_2O} \right)$$

$$G_{H_2O,RxN 3} = 0.3213 G_{CaO,RxN 3}$$

$$G_{H_2O,RxN 3} = 0.1699 G_{Na_2CO_3,RxN 1}$$

$$G_{Ca(OH)_2,RxN 3} = -G_{CaO,RxN 3} \left(\frac{1 \text{ mol } CaO}{56.07 \text{ g } CaO} \right) \left(\frac{1 \text{ mol } Ca(OH)_2}{1 \text{ mol } CaO} \right) \left(\frac{74.093 \text{ g } Ca(OH)_2}{1 \text{ mol } Ca(OH)_2} \right)$$

$$G_{Ca(OH)_2,RxN 3} = -1.3214 G_{CaO,RxN 3}$$

$$G_{Ca(OH)_2,RxN 3} = -0.6992 G_{Na_2CO_3,RxN 1}$$

Por lo que podemos sustituir los términos fuente en las ecuaciones que obtuvimos:

$$3000 \text{ g} + X \text{ g} - m_3 + 4000 \text{ g} - m_5 - m_6 = 0$$

$$-m_{CaWO_4,5} + 2.7168 G_{Na_2CO_3,RxN 1} = -2556 \text{ g } CaWO_4$$

$$X \text{ g} - m_{Na_2CO_3,6} + G_{Na_2CO_3,RxN 1} = 0$$

$$-m_{CO_2,3} - 0.4152 G_{Na_2CO_3,RxN 1} = 0$$

$$-(W)m_6 - 2.7724 G_{Na_2CO_3,RxN 1} = 0$$

$$-m_{H_2O,6} + 0.1699 G_{Na_2CO_3,RxN 1} = -3903.31 \text{ g } H_2O$$

$$-m_{Ca(OH)_2,6} - 0.6992 G_{Na_2CO_3,RxN 1} = 0$$

Considerando que:

$$W_{Na_2CO_3,6} + W_{H_2O,6} + W_{Ca(OH)_2,6} = 1 - W$$

Podemos emplear estas tres ecuaciones para obtener una adicional:

$$X \text{ g} - m_{Na_2CO_3,6} + G_{Na_2CO_3,RxN 1} = 0$$

$$-m_{H_2O,6} + 0.1699 G_{Na_2CO_3,RxN 1} = -3903.31 \text{ g } H_2O$$

$$-m_{Ca(OH)_2,6} - 0.6992 G_{Na_2CO_3,RxN 1} = 0$$

Ya que las podemos escribir de la forma:

$$m_{Na_2CO_3,6} = G_{Na_2CO_3,RxN 1} + X \text{ g}$$

$$m_{H_2O,6} = 0.1699 G_{Na_2CO_3,RxN 1} + 3903.31 \text{ g } H_2O$$

$$m_{Ca(OH)_2,6} = -0.6992G_{Na_2CO_3,RxN 1}$$

$$W_{Na_2CO_3,6} = \frac{G_{Na_2CO_3,RxN 1} + X g}{m_6}$$

$$W_{H_2O,6} = \frac{0.1699G_{Na_2CO_3,RxN 1} + 3903.31 g H_2O}{m_6}$$

$$W_{Ca(OH)_2,6} = \frac{-0.6992G_{Na_2CO_3,RxN 1}}{m_6}$$

Por lo que:

$$1 - W = \frac{G_{Na_2CO_3,RxN 1} + X g}{m_6} + \frac{0.1699G_{Na_2CO_3,RxN 1} + 3903.31 g H_2O}{m_6} + \frac{-0.6992G_{Na_2CO_3,RxN 1}}{m_6}$$

$$1 - W = \frac{3903.31 g + X g + 0.4707G_{Na_2CO_3,RxN 1}}{m_6}$$

$$m_6 = \frac{3903.31 g + X g + 0.4707G_{Na_2CO_3,RxN 1}}{1 - W}$$

El cual podemos sustituir en la siguiente ecuación:

$$-(W)m_6 - 2.7724G_{Na_2CO_3,RxN 1} = 0$$

Para llegar a:

$$-W \left(\frac{3903.31 g + X g + 0.4707G_{Na_2CO_3,RxN 1}}{1 - W} \right) - 2.7724G_{Na_2CO_3,RxN 1} = 0$$

$$-\left(\frac{W}{1 - W} \right) (3903.31 g + X g + 0.4707G_{Na_2CO_3,RxN 1}) - 2.7724G_{Na_2CO_3,RxN 1} = 0$$

$$-\left(\frac{W}{1 - W} \right) (3903.31 g + X g) - \left(\frac{W}{1 - W} \right) 0.4707G_{Na_2CO_3,RxN 1} - 2.7724G_{Na_2CO_3,RxN 1} = 0$$

$$-\left(\left(\frac{W}{1 - W} \right) (0.4707) + 2.7724 \right) G_{Na_2CO_3,RxN 1} = \left(\frac{W}{1 - W} \right) (3903.31 + X)$$

$$G_{Na_2CO_3,RxN 1} = \frac{\left(\frac{W}{1 - W} \right) (3903.31 + X)}{-\left(\left(\frac{W}{1 - W} \right) (0.4707) + 2.7724 \right)}$$

Quedando el término fuente en función de W y X, que varían de prueba a prueba. Los resultados de este cálculo se presentan en la Tabla 3 y en la Figura 4.

Tabla 3.- Masa de Na₂CO₃ consumida en función de la masa agregada.

Masa de Na ₂ CO ₃ agregada (g)	660	940	1320	1645	1980
W _{Na₂WO₄} en la solución	0.2238	0.3021	0.2975	0.2960	0.2911
G _{Na₂CO₃,Rxn 1} (g)	-452.42	-704.42	-744.33	-785.35	-814.59

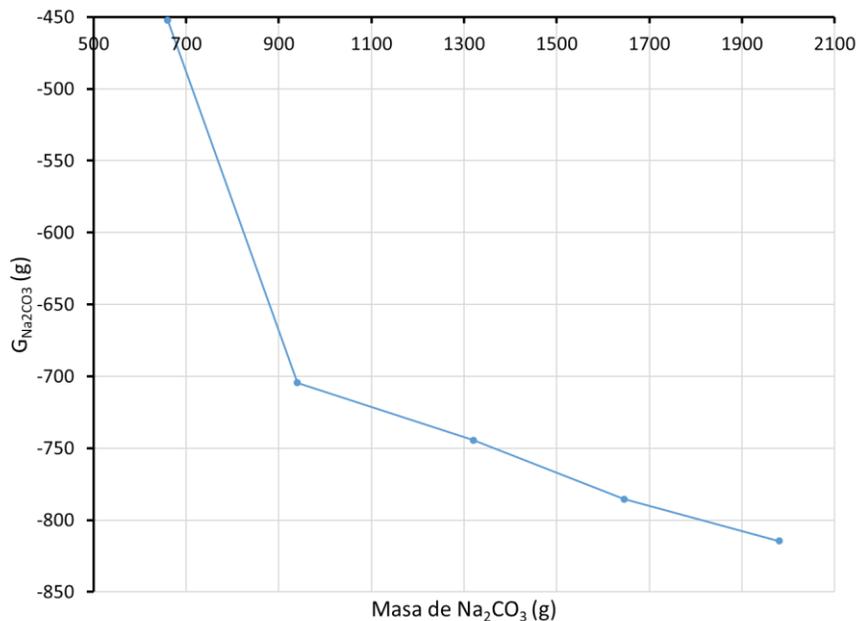


Figura 4.- Consumo de Na₂CO₃ en función de la masa agregada.

Para obtener la eficiencia de reacción para producir Na₂WO₄ (b) comenzamos por calcular la cantidad que se puede producir estequiométricamente y comparamos con el termino fuente producido, para finalmente usar la siguiente expresión:

$$\% Ef = \frac{Masa\ producida}{Masa\ estequiometrica} \times 100\%$$

Los resultados se muestran en la Tabla 4 y la Figura 5.

Tabla 4.- Eficiencia de producción de Na₂WO₄.

Masa de Na ₂ CO ₃ agregada (g)	660	940	1320	1645	1980
W _{Na₂WO₄} en la solución	0.2238	0.3021	0.2975	0.2960	0.2911
G _{Na₂CO₃,Rxn 1} (g)	-452.42	-704.42	-744.33	-785.35	-814.59
G _{Na₂WO₄,Rxn 1} (g)	1254.30	1952.94	2063.57	2177.32	2258.38
G _{Na₂WO₄,Estequiometrico} (g)	1829.79	2606.07	2606.07	2606.07	2606.07
% Eficiencia	68.55	74.94	79.18	83.55	86.66

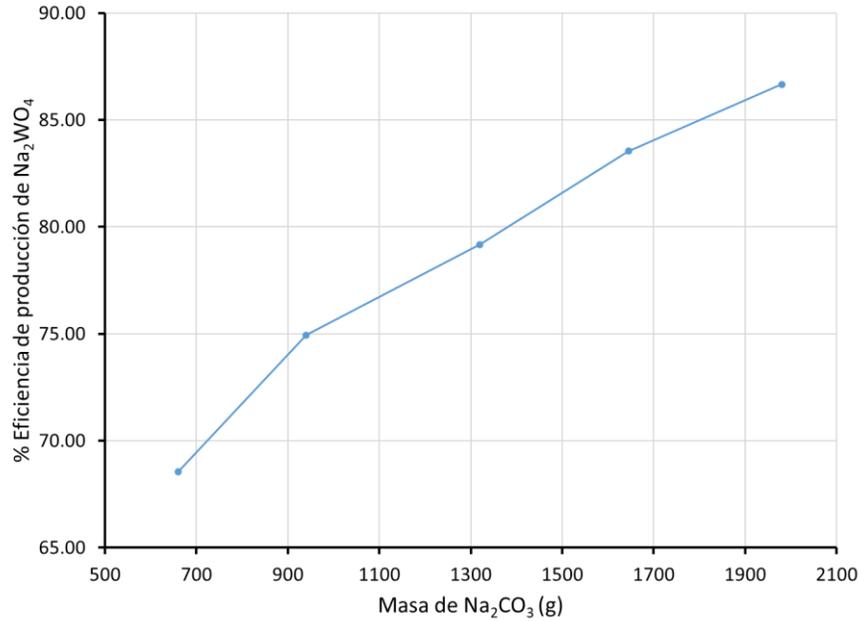


Figura 5.- Eficiencia de producción de Na₂WO₄ contra la masa agregada de Na₂CO₃.

Por otra parte, la fracción masa obtenida de Ca₂SO₄·2H₂O (c) se obtiene calculando el término fuente de CaWO₄ para obtener la masa total de la corriente 5 y por definición obtener la fracción. Recordando que la masa de Ca₂SO₄·2H₂O de dicha corriente permanece constante en todos los cálculos.

Los resultados se muestran en la Tabla 5 y la Figura 6.

Tabla 5.- Fracción masa de Ca₂SO₄·2H₂O.

Masa de Na ₂ CO ₃ agregada (g)	660	940	1320	1645	1980
W _{Na₂WO₄} en la solución	0.2238	0.3021	0.2975	0.2960	0.2911
G _{Na₂CO₃, RxN 1} (g)	-452.42	-704.42	-744.33	-785.35	-814.59
m _{Ca₂SO₄·2H₂O,5} (g)	444	444	444	444	444
G _{CaWO₄, RxN 1} (g)	-1229.15	-1913.77	-2022.19	-2133.65	-2213.09
m _{CaWO₄,5} (g)	1326.85	642.23	533.81	422.35	342.91
m ₅ (g)	1770.85	1086.23	977.81	866.35	786.91
W _{Ca₂SO₄·2H₂O,5}	0.25	0.41	0.45	0.51	0.56

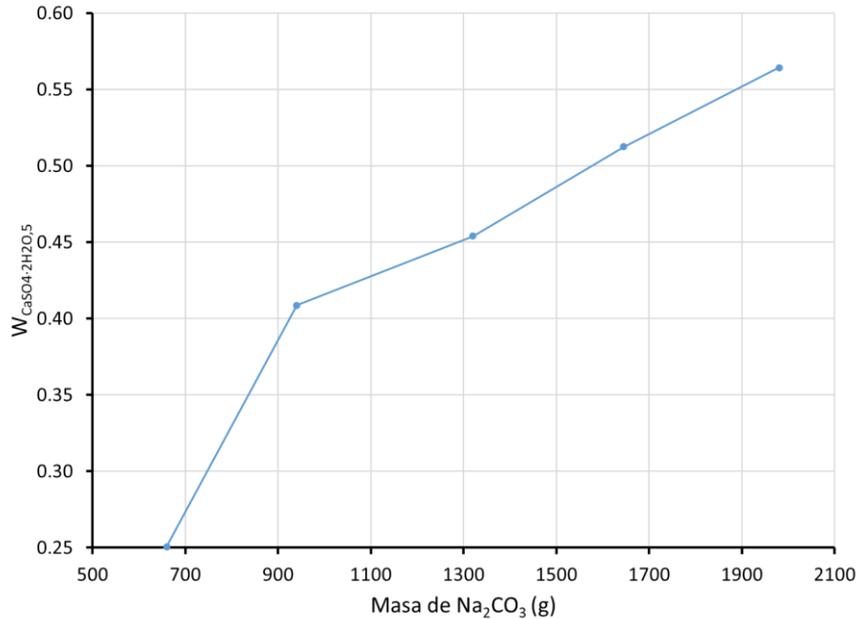


Figura 6.- Fracción masa de Ca₂SO₄·2H₂O contra masa de Na₂CO₃ adicionada.

Para calcular el volumen de los gases de salida (d), primeramente, hay que calcular el término fuente asociado al CO₂, recordemos que nuevamente el de H₂O permanece constante independientemente de la masa de Na₂CO₃ agregada. Una vez con la masa de gases, hay que convertirlos a cantidad de sustancia y finalmente con la ley de gas ideal convertimos a volumen la cantidad de los mismos.

Los resultados se presentan en la Tabla 6 y la Figura 7.

Tabla 6.- Volumen de gases producidos.

Masa de Na ₂ CO ₃ agregada (g)	660	940	1320	1645	1980
W _{Na₂WO₄} en la solución	0.2238	0.3021	0.2975	0.2960	0.2911
G _{Na₂CO₃,RxN 1} (g)	-452.42	-704.42	-744.33	-785.35	-814.59
m _{H₂O,3} (g)	92.69	92.69	92.69	92.69	92.69
G _{CO₂,RxN 1} (g)	187.85	292.48	309.04	326.08	338.22
m ₃ (g)	280.54	385.17	401.73	418.77	430.91
n _{H₂O,3} (mol)	5.15	5.15	5.15	5.15	5.15
n _{CO₂,3} (mol)	4.27	6.65	7.02	7.41	7.69
n ₃ (mol)	9.41	11.79	12.17	12.55	12.83
V ₃ (L)	758.76	950.39	980.73	1011.93	1034.17

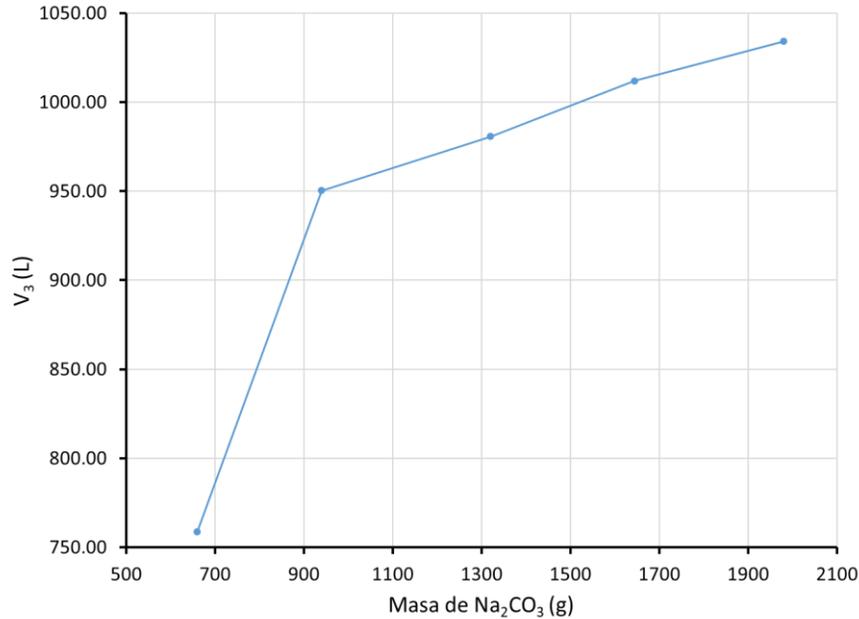


Figura 7.- Volumen de gases producidos contra masa de Na₂CO₃ adicionada.

Por otra parte, para calcular la masa de la solución lixiviada producida podemos o bien emplear las ecuaciones que despejamos:

$$\begin{aligned}
 m_{Na_2CO_3,6} &= G_{Na_2CO_3,RxN 1} + X \text{ g} \\
 m_{H_2O,6} &= 0.1699G_{Na_2CO_3,RxN 1} + 3903.31 \text{ g } H_2O \\
 m_{Ca(OH)_2,6} &= -0.6990G_{Na_2CO_3,RxN 1} \\
 m_{Na_2WO_4,6} &= -2.7724G_{Na_2CO_3,RxN 1}
 \end{aligned}$$

O emplear directamente la ecuación que la relaciona con W:

$$\begin{aligned}
 -(W)m_6 - 2.7724G_{Na_2CO_3,RxN 1} &= 0 \\
 m_6 &= \frac{-2.7724G_{Na_2CO_3,RxN 1}}{W}
 \end{aligned}$$

En este caso, para fines ilustrativos usaremos ambos métodos, los resultados se presentan en la Tabla 7 y la Figura 8.

Tabla 7.- Masa de solución lixiviada obtenida.

Masa de Na ₂ CO ₃ agregada (g)	660	940	1320	1645	1980
W _{Na₂WO₄} en la solución	0.2238	0.3021	0.2975	0.2960	0.2911
G _{Na₂CO₃,RxN 1} (g)	-452.42	-704.42	-744.33	-785.35	-814.59
m _{Na₂CO₃,6} (g)	207.58	235.58	575.67	859.65	1165.41
m _{H₂O,6} (g)	3826.44	3783.63	3776.85	3769.88	3764.91
m _{Ca(OH)₂,6} (g)	316.24	492.39	520.28	548.96	569.40
m _{Na₂WO₄,6} (g)	1254.30	1952.94	2063.57	2177.32	2258.38
m ₆ (g)	5604.56	6464.53	6936.38	7355.80	7758.10
m ₆ (W) (g)	5604.56	6464.53	6936.38	7355.80	7758.10

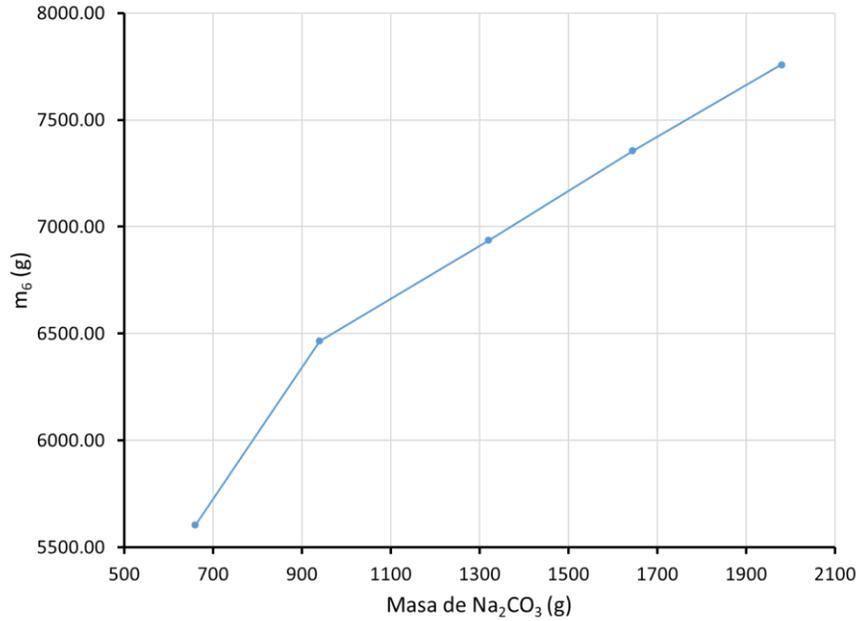


Figura 8.- Masa de solución lixiviada obtenida.

Finalmente, y únicamente para saber si el balance se completo satisfactoriamente podemos emplear la siguiente expresión:

$$3000 \text{ g} + X \text{ g} - m_3 + 4000 \text{ g} - m_5 - m_6 = 0$$

Los resultados de evaluar dicha expresión se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8.- Resultados del balance de materia:

Masa de Na ₂ CO ₃ agregada (g)	660	940	1320	1645	1980
W _{Na₂WO₄} en la solución	0.2238	0.3021	0.2975	0.2960	0.2911
m ₃ (g)	280.54	385.17	401.73	418.77	430.91
m ₅ (g)	1770.85	1086.23	977.81	866.35	786.91
m ₆ (g)	5604.56	6464.53	6936.38	7355.80	7758.10
Suma evaluada (g)	4.05	4.07	4.07	4.08	4.08

Nótese que el balance se cumple ya que la suma evaluada es muy pequeña en comparación a las cantidades que se introducen en las corrientes (miles de gramos), y estos gramos de diferencia muy seguramente se deban a la precisión de los cálculos y no al planteamiento de la solución.

Tenemos que tener en cuenta que hemos omitido la corriente 4 en la solución de las ecuaciones, por lo que desde la definición del problema se pudo establecer que la misma no formaría parte del sistema, simplificando el tratamiento de las ecuaciones de balance.