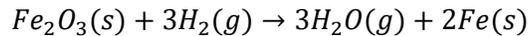


Ejemplo de balance macroscópico de materia (Reducción directa)

La Figura 1 muestra una planta que cuenta con un horno de reducción directa para la obtención de hierro esponja, para ello emplea H_2 con el fin de reducir 2000kg/h de hematita (Fe_2O_3), de acuerdo a la reacción:



Al reactor se alimenta la hematita y un gas reductor (corriente E) con una composición de 97.5% H_2 y 2.5% CO_2 , obteniéndose hierro esponja, que se considerará como Fe puro, además de salir del mismo una mezcla con el gas remanente de la reducción y la humedad generada del mismo proceso (corriente S).

Con el fin de no desperdiciar el hidrogeno remanente en la mezcla de gases que abandonan el horno de reducción directa, este es procesado para recircular el mismo (corriente R). Inicialmente este gas entra a una trampa de agua, que condensa la humedad en el gas y la remueve del mismo. Consideré que a la salida de está (corriente H) la mezcla gaseosa no presentará ningún contenido de H_2O .

Con el fin de que la composición química del gas que entra en el reactor se mantenga, parte del gas que abandona la trampa de agua es purgado (corriente P) y posteriormente reacondicionado con una alimentación fresca (corriente F) con una composición de 99% H_2 y 1% CO_2 , antes de volver a entrar al reactor y repetir el proceso.

Se sabe que la relación entre los flujos molares de la corriente recirculada (R) y la alimentación fresca (F) es de 4:1, considerando que el sistema ha alcanzado el estado estacionario.

Calcule el flujo y la composición química de la corriente de purga (P).

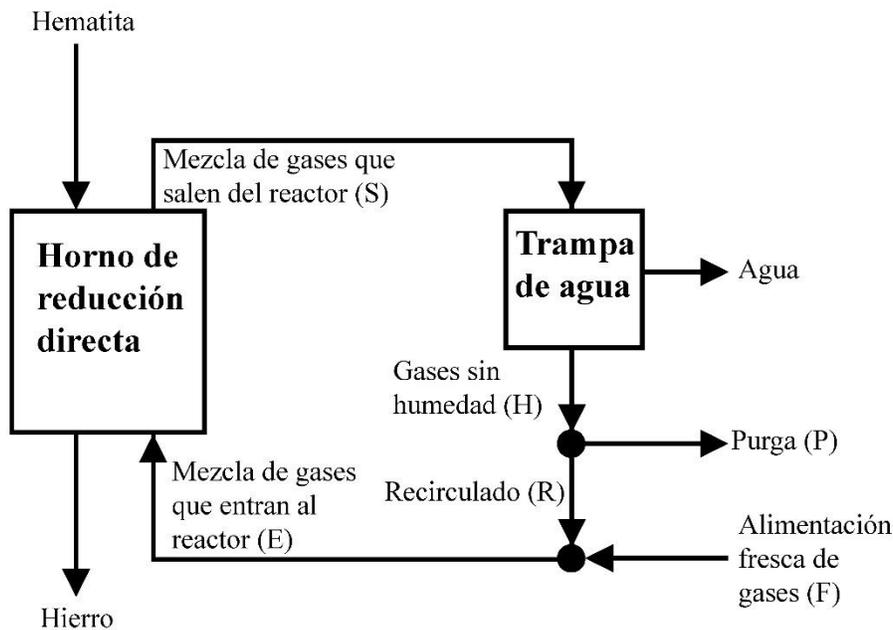


Figura 1.- Esquema de un proceso de reducción directa con recirculación de gases.

Para resolver este problema, vamos a comenzar realizando un esquema con todos los datos conocidos del mismo, esto incluye todos los datos que podamos calcular con las relaciones estequiométricas conocidas, para ello hay que considerar que el balance lo podemos realizar en unidades molares, debido a que la mayor parte del sistema incluye gases y existe reacción química dentro del mismo.

Comencemos calculando los términos fuente asociados a la reacción de reducción de la hematita en unidades molares, en este caso al tener únicamente una reacción química no es necesario señalar la misma.

$$G_{Fe_2O_3} = -2000 \frac{kg Fe_2O_3}{h} \left(\frac{1 kg mol Fe_2O_3}{160 kg Fe_2O_3} \right) = \frac{-12.5 kg mol Fe_2O_3}{h}$$

$$G_{Fe} = 12.5 \frac{kg mol Fe_2O_3}{h} \left(\frac{2 kg mol Fe}{1 kg mol Fe_2O_3} \right) = \frac{25 kg mol Fe}{h}$$

$$G_{H_2} = -12.5 \frac{kg mol Fe_2O_3}{h} \left(\frac{3 kg mol H_2}{1 kg mol Fe_2O_3} \right) = \frac{-37.5 kg mol H_2}{h}$$

$$G_{H_2O} = 12.5 \frac{kg mol Fe_2O_3}{h} \left(\frac{3 kg mol H_2O}{1 kg mol Fe_2O_3} \right) = \frac{37.5 kg mol H_2O}{h}$$

Y procedemos a colocar estos junto con los demás datos conocidos en un esquema del proceso, tal como se muestra en la Figura 2.

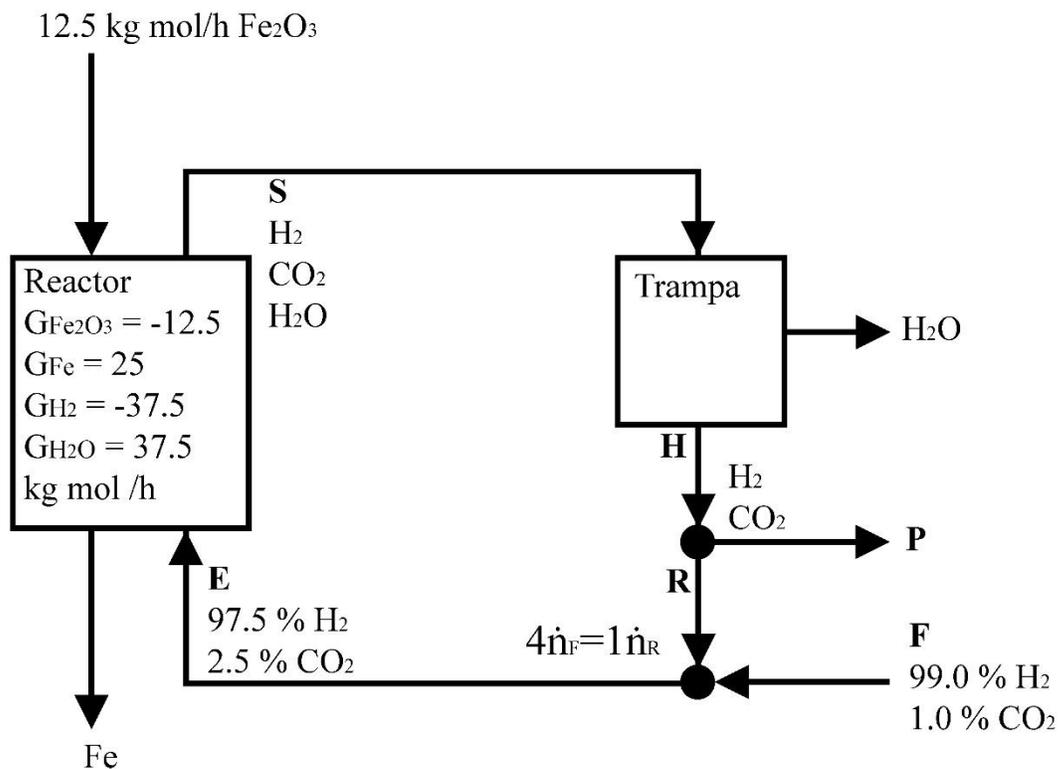


Figura 2.- Esquema de un proceso de reducción directa con recirculación de gases con todos los datos conocidos del proceso.

Una vez realizado el esquema procedemos a definir el sistema sobre el que realizaremos el balance. En este caso es pertinente comentar que en principio se realizarían seis balances dentro del sistema, es decir, los correspondientes a Fe_2O_3 , Fe , H_2 , H_2O , CO_2 y el balance general, sin embargo, puede observarse que los balances de Fe_2O_3 , Fe y H_2O se pueden obviar, ya que solo participan en una corriente y en un término fuente, pudiendo eliminarse estos componentes de nuestro sistema. Además al realizar este cambio, la trampa de agua y el reactor podrían incorporarse en un solo sistema, ya que la corriente de salida que transporta la mezcla de gases con humedad no es relevante para nuestro objetivo de cálculo, además de que se “elimino” el agua de los componentes del sistema que participarán en el balance. La Figura 3 muestra el nuevo sistema tras realizar los cambios sugeridos.

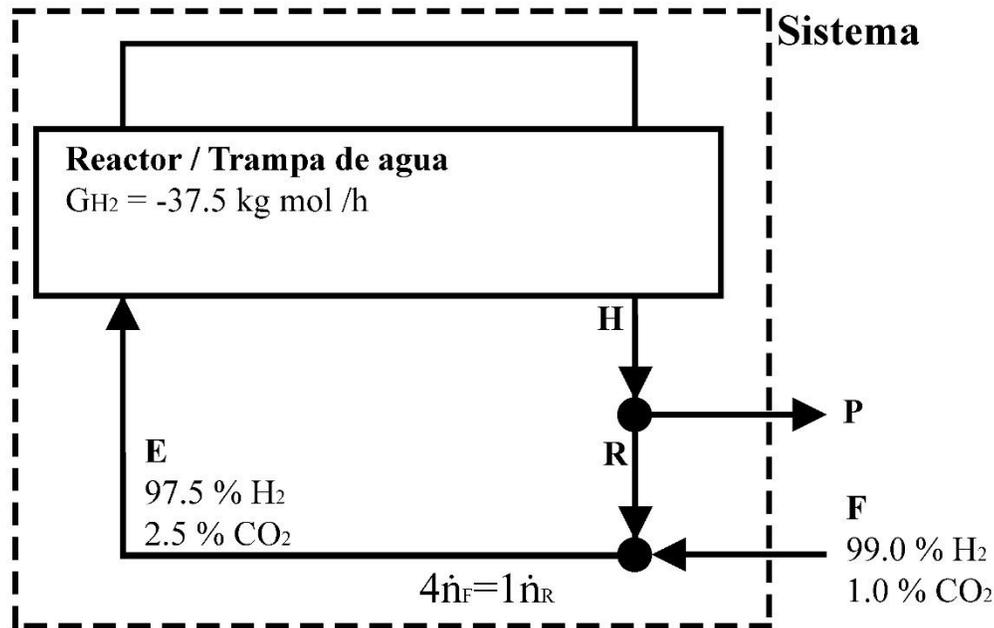


Figura 3.- Esquema de un proceso de reducción directa con recirculación de gases considerando solo las especies H_2 y CO_2 .

En la Figura 3, se ha colocado una definición del sistema en el cual únicamente se ven dos corrientes, la corriente F que entra y la corriente P que sale, considerando únicamente las especies H_2 y CO_2 . Si calculamos los grados de libertad a este punto, tenemos un grado de libertad, por lo que se requiere información adicional para realizar el balance, y si observamos con detenimiento el esquema del proceso vemos que estamos perdiendo información de las corrientes internas del sistema definido, sobre todo la composición química de la corriente E y la relación que se conoce entre los flujos molares de las corrientes F y R, por lo cual se define un subsistema que engloba las tres corrientes de las cuales poseemos información, el cual se presenta en la Figura 4.

Si calculamos los grados de libertad para el subsistema mostrado en la Figura 4, también tenemos un grado de libertad dentro del mismo aun considerando la relación conocida entre los flujos molares de la alimentación fresca y el recirculado. Sin embargo, existe una conexión entre el sistema y el subsistema que elimina el grado de libertad que existe entre ambos, la cual es que la composición química de las corrientes P y R es la misma, esto debido a que la purga de gas es un proceso completamente físico, en donde parte del mismo abandona el reactor, pero sin verse modificada su composición química. Debido a esta conexión entre el sistema y el subsistema, los grados de libertad de ambos se reducen a cero al realizar el balance de ambos.

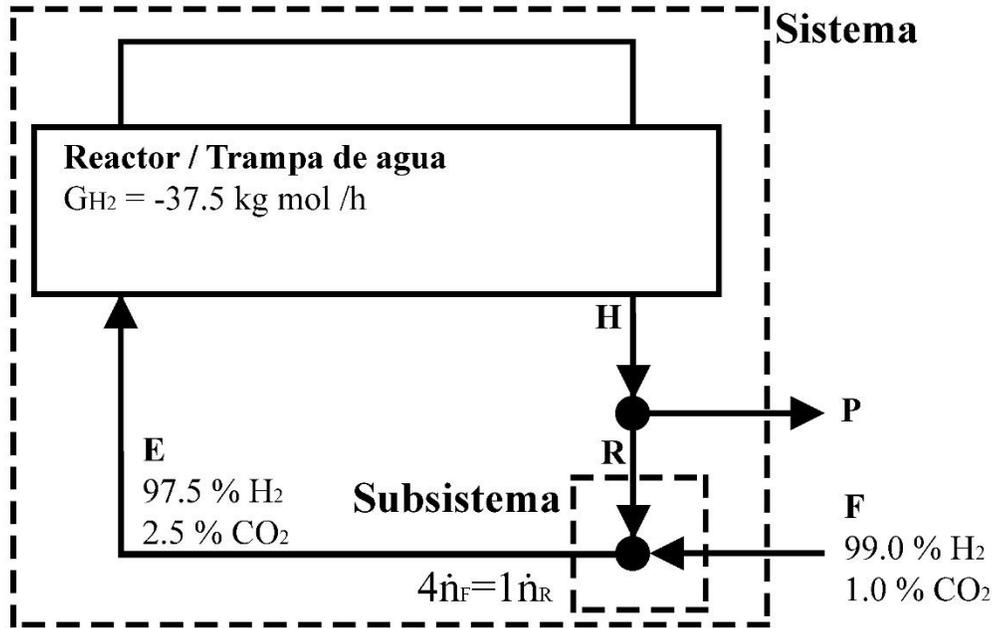


Figura 4.- Definición del sistema y subsistema considerados en el balance del proceso de reducción directa con recirculación de gases para las especies H₂ y CO₂.

Una vez definido completamente el sistema, el subsistema y establecida la conexión entre ambos, procedamos a realizar las ecuaciones de balance, tanto para el sistema como el subsistema, comenzando por las relacionadas con el subsistema.

Ecuación general del subsistema:

$$\begin{aligned}
 E - S + G &= Ac \\
 E - S &= 0 \\
 \dot{n}_F + \dot{n}_R - \dot{n}_E &= 0
 \end{aligned}$$

Ecuación CO₂ del subsistema:

$$\begin{aligned}
 E - S + G &= Ac \\
 E - S &= 0 \\
 \dot{n}_{CO_2,F} + \dot{n}_{CO_2,R} - \dot{n}_{CO_2,E} &= 0 \\
 X_{CO_2,F}\dot{n}_F + X_{CO_2,R}\dot{n}_R - X_{CO_2,E}\dot{n}_E &= 0 \\
 0.01\dot{n}_F + X_{CO_2,R}\dot{n}_R - 0.025\dot{n}_E &= 0
 \end{aligned}$$

Ecuación H₂ del subsistema:

$$\begin{aligned}
 E - S + G &= Ac \\
 E - S &= 0 \\
 \dot{n}_{H_2,F} + \dot{n}_{H_2,R} - \dot{n}_{H_2,E} &= 0 \\
 X_{H_2,F}\dot{n}_F + X_{H_2,R}\dot{n}_R - X_{H_2,E}\dot{n}_E &= 0 \\
 0.99\dot{n}_F + X_{H_2,R}\dot{n}_R - 0.975\dot{n}_E &= 0
 \end{aligned}$$

Además contamos con la relación especial entre los flujos molares de R y F:

$$4\dot{n}_F = \dot{n}_R$$

La cual podemos sustituir en el balance general:

$$\dot{n}_F + 4\dot{n}_F - \dot{n}_E = 0$$

Por lo que:

$$5\dot{n}_F = \dot{n}_E$$

Y dado que conocemos la relación entre los tres flujos molares, podemos sustituir las mismas en la ecuación del CO₂:

$$0.01\dot{n}_F + X_{CO_2,R}(4\dot{n}_F) - 0.025(5\dot{n}_F) = 0$$

$$0.01\dot{n}_F + 4X_{CO_2,R}\dot{n}_F - 0.125\dot{n}_F = 0$$

$$0.01 + 4X_{CO_2,R} - 0.125 = 0$$

$$X_{CO_2,R} = \frac{0.115}{4}$$

$$X_{CO_2,R} = 0.02875$$

Y dado que:

$$X_{CO_2,R} + X_{H_2,R} = 1.0$$

$$X_{H_2,R} = 1.0 - 0.02875$$

$$X_{H_2,R} = 0.97125$$

Ahora bien, procedemos a desarrollar las ecuaciones de balance para el sistema, ya que en este punto no contamos con información para terminar de calcular los flujos molares de las corrientes presentes en el subsistema.

Ecuación general del sistema:

$$E - S + G = Ac$$

$$E - S + G = 0$$

$$\dot{n}_F - \dot{n}_P + G_{H_2} = 0$$

$$\dot{n}_F - \dot{n}_P - 37.5 \frac{\text{kg mol}}{\text{h}} = 0$$

$$\dot{n}_F - \dot{n}_P = 37.5 \frac{\text{kg mol}}{\text{h}}$$

Ecuación CO₂ del sistema:

$$E - S + G = Ac$$

$$E - S = 0$$

$$\dot{n}_{CO_2,F} - \dot{n}_{CO_2,P} = 0$$

$$X_{CO_2,F}\dot{n}_F - X_{CO_2,P}\dot{n}_P = 0$$

$$0.01\dot{n}_F - X_{CO_2,P}\dot{n}_P = 0$$

Ecuación H₂ del sistema:

$$E - S + G = Ac$$

$$E - S + G = 0$$

$$\dot{n}_{H_2,F} - \dot{n}_{H_2,R} + G_{H_2} = 0$$

$$X_{H_2,F}\dot{n}_F - X_{H_2,P}\dot{n}_P + G_{H_2} = 0$$

$$0.99\dot{n}_F - X_{H_2,P}\dot{n}_P - 37.5 \frac{\text{kg mol H}_2}{\text{h}} = 0$$

$$0.99\dot{n}_F - X_{H_2,P}\dot{n}_P = 37.5 \frac{kg \text{ mol } H_2}{h}$$

Finalmente hay que considerar la relación especial que conecta ambos sistemas, la cual nos indica que:

$$\begin{aligned} X_{H_2,P} &= X_{H_2,R} = 0.97125 \\ X_{CO_2,P} &= X_{CO_2,R} = 0.02875 \end{aligned}$$

Por lo que sustituyendo en la ecuación del CO₂, queda:

$$\begin{aligned} 0.01\dot{n}_F - 0.02875\dot{n}_P &= 0 \\ \dot{n}_F &= \frac{0.02875\dot{n}_P}{0.01} \\ \dot{n}_F &= 2.875\dot{n}_P \end{aligned}$$

Que sustituyendo en el balance general del sistema nos da como resultado:

$$\begin{aligned} 2.875\dot{n}_P - \dot{n}_P &= 37.5 \frac{kg \text{ mol}}{h} \\ 1.875\dot{n}_P &= 37.5 \frac{kg \text{ mol}}{h} \\ \dot{n}_P &= \frac{37.5 \frac{kg \text{ mol}}{h}}{1.875} \\ \dot{n}_P &= 20 \frac{kg \text{ mol}}{h} \end{aligned}$$

Con lo cual conocemos ya el flujo y la composición química de la corriente de purga, que era nuestro objetivo de cálculo:

$$\begin{aligned} \dot{n}_P &= 20 \frac{kg \text{ mol}}{h} \\ X_{H_2,P} &= 0.97125 \\ X_{CO_2,P} &= 0.02875 \end{aligned}$$

Y pudiendo calcular el resto de las corrientes y composiciones químicas en caso de que sean requeridas.