



BALANCES DE MATERIA EN ESTADO ESTACIONARIO CON GENERACIÓN

| | |
|--------------------------|--|
| Apellidos, nombre | Castelló Gómez, Marisa (mcasgo@upv.es) Fito Suñer, Pedro (pedfisu@tal.upv.es) Heredia Gutiérrez, Ana (anhegu@tal.upv.es) |
| Departamento | Departamento de Tecnología de Alimentos |
| Centro | Universitat Politècnica de València |

1 Resumen

En este artículo vamos a mostrar cómo trabajar con **balances de materia** que contemplan el término de **generación**. Con ello, pretendemos dar una visión del manejo de esta herramienta en sistemas en los que tenga lugar alguna *reacción química*.

2 Introducción

Los balances sirven para cuantificar los datos de los procesos, para hacer cálculos y predicciones del comportamiento de un sistema bajo ciertas condiciones, para contrastar hipótesis, o para determinar por ejemplo algún dato preciso del diagrama de flujo. Se basan en **Ley de la Conservación de la Materia o Ley de Lomonósov-Lavoisier o Primer principio de la termodinámica que establece que la materia y la energía ni se crea ni se destruye, sino que se transforma** (Figura 1). Por ejemplo, una masa en un sistema aislado no es creada ni destruida por reacciones químicas o transformaciones físicas. Por tanto, la masa de los productos en una reacción química debe ser igual a la masa de los reactivos. Este principio ha sido fundamental para grandes avances de la física. Fue la base con la que Albert Einstein desarrolló la teoría de la relatividad describiendo a la materia y a la energía como intercambiables frente a la conservación ($E=mc^2$).



Figura 1. Ejemplos de la ley de conservación de la materia en el que se ve que la suma de la masa de los reactivos es igual a la suma de la masa de los productos

Los balances (de materia y energía) tienen siempre la misma estructura general:

$$\text{ENTRADAS} + \text{GENERACIÓN} = \text{SALIDAS} + \text{ACUMULACIÓN}$$

Si pensamos en un sistema (volumen de control) tal y como se representan en la Figura 2, los distintos términos de la ecuación general de los balances hacen referencia a:



Figura 2. Representación de la ecuación general de los balances

- **Entradas/Salidas:** Las corrientes que cruzan los límites del sistema entrando o saliendo
- **Acumulación:** Variación en un determinado tiempo de aquello que hay en el interior del sistema.
- **Generación:** Lo que aparece o desaparece dentro de los límites del sistema sin estar inicialmente presente ni haberse transferido a través de los límites asociado a reacciones químicas, bioquímicas, microbiológicas, mecánicas o nucleares.

Así, los balances de materia resultan de gran utilidad para entre otros:

- Calcular la cantidad de componentes que entran o salen en un proceso sin medirlos
- Estimar la composición de las corrientes sin analizarlas
- Evaluar rendimientos y eficacia de procesos
- Diseñar de procesos

De la ecuación general de los balances de materia, hay que tener presente que, si estamos trabajando en estado estacionario la variable tiempo no afecta a las propiedades fisicoquímicas, y por tanto no se contemplará el término de acumulación. Por otra parte, si no se produce aparición o desaparición de una especie química en el proceso como sí ocurre por ejemplo en ciertos procesos como la fermentación, hidrólisis, isomerización, etc..., el término de generación no se considera.

En este artículo, nos centraremos en la resolución de los balances de materia con generación y en estado estacionario, es decir sin acumulación.

3 Objetivos

Una vez hayas leído con detenimiento este documento, serás capaz de:

- Aplicar el análisis de grados de libertad de los datos y variables desconocidas que intervienen en las corrientes de un proceso
- Plantear los balances de materia total y de componentes de un sistema
- Saber cómo manejar el término de generación en los balances
- Resolver el sistema ecuaciones que se obtenga para deducir las variables incógnitas y poder diseñar adecuadamente un proceso industrial con circulación de corrientes donde sea necesario caracterizar su caudal y composición

4 Desarrollo

Para poder cuantificar los caudales y composiciones de las corrientes involucradas en un proceso que trabaja en estado estacionario y con generación utilizaremos los siguientes parámetros:

m: caudales máscicos (kg/h) de cada etapa

x_i : fracción máscica del componente i (kg i/kg totales)

G_i : caudal máscico de generación del componente i.

Los balances de materia que se plantean en estos casos son:

Balance de Materia Total: $\sum m_{\text{salidas}} - \sum m_{\text{entradas}} = 0$

Balance de Materia de cada componente: $\sum (m \cdot x_i)_{\text{salidas}} - \sum (m \cdot x_i)_{\text{entradas}} = G_i^*$

*Si aparece la especie química, la generación será positiva y negativa si desaparece

El planteamiento de los balances se plasmará en una serie de ecuaciones matemáticas que podremos resolver, teniendo en cuenta unos condicionantes que veremos en los siguientes apartados. Para saber la secuencia de resolución del proceso, utilizaremos el estudio de grados de libertad. Este estudio nos indicará cuando un volumen de control tiene solución única. Para poder aplicarlo, primero será necesario adecuar la información que nos faciliten y modificar las variables y ecuaciones, eliminando las dependencias existentes.

4.1 Estudio de variables independientes

Un sistema de ecuaciones puede resolverse si se cumplen dos condiciones:

- 1ª) Las variables deben de ser independientes entre ellas
- 2ª) Las ecuaciones deben de ser determinadas.

Al analizar cualquier proceso, se producen **tres condicionantes** que provocan que parte de las variables del sistema sean dependientes entre ellas y que parte de las ecuaciones obtenidas al plantear los balances sean indeterminadas:

- **Condicionante 1.** En cada corriente el sumatorio de las fracciones es igual a uno, por lo que todas las fracciones de corrientes con más de un componente están relacionadas a través de la suma de las mismas ($\sum x = 1$), y por tanto son dependientes

Solución: Considerar como variables independientes todas las fracciones menos una en aquellas corrientes con más de un componente. Si una corriente es pura, es decir está formada por un solo componente, se considera éste como variable independiente en el sistema de variables.

- **Condicionante 2.** Al aplicarse el 1er principio de la termodinámica sobre cada reacción que se produce, se cumple que el sumatorio de generaciones de compuestos que se consumen es igual al sumatorio de los que se produce, y por tanto son dependientes: $\sum G_{\text{consumidos}} = \sum G_{\text{producidos}}$.

Solución: No considerar un término de generación por reacción del sistema de variables.

- **Condicionante 3.** Al sumar los balances de todos los componentes nos da como resultado el balance de materia total, por lo que, si consideramos un sistema de ecuaciones con los balances de todos los componentes y el de materia total, será indeterminado.

Solución: No considerar un balance de componente, preferiblemente el mismo componente que hemos eliminado como fracción del sistema de ecuaciones.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el sistema de ecuaciones pasará a ser determinado y compuesto únicamente por variables y ecuaciones independientes entre sí.

4.2 Planteamiento de los Balances con Generación

Para trabajar correctamente con el término de generación en los balances de materia es necesario conocer la ESTEQUIOMETRÍA de las relaciones químicas involucradas en cada una de las operaciones básicas del proceso.

Puesto que la masa es una magnitud conservativa, la suma de los términos de generación de los componentes que desaparecen es igual a la suma de los términos de componentes que aparecen. Esto supone que en la ecuación general de los balances no se contemple ningún término de generación. Sin embargo, sí que los contemplaremos en los balances de componentes teniendo en cuenta la relación matemática procedente de la estequiometría. Por ejemplo, si tenemos la reacción $A \rightarrow B + C$, tendremos: $G_A = G_B + G_C$.

Veamos un ejemplo: Una planta industrial produce Paracetamol® en tres etapas (Figura 3). La primera consiste en reactor donde se introducen 100 kg/h de una mezcla de nitrobenzono al 92% con agua, agregándole a demanda hidrogeno (H_2) para producir la reacción R_1 con un rendimiento de nitrobenzono del 90%. El producto de la reacción se mezcla en un segundo reactor con anhídrido acético a demanda para realizar la reacción R_2 donde se separará por un lado el paracetamol producido con el agua existente y por otro lado el ácido acético con el nitrobenzono residual. El paracetamol humectado se lleva a un proceso de deshidratación donde se elimina parte del agua hasta obtener grageas de paracetamol con un 2% de agua.

Datos:

R_1 : nitrobenzono (123 g/mol) + $2H_2$ (2 g/mol) \rightarrow aminofenol (109 g/mol) + H_2O (18 g/mol);

R_2 : aminofenol (109 g/mol) + anhídridoacético (102 g/mol) \rightarrow paracetamol (151 g/mol) + ácido acético (60 g/mol).

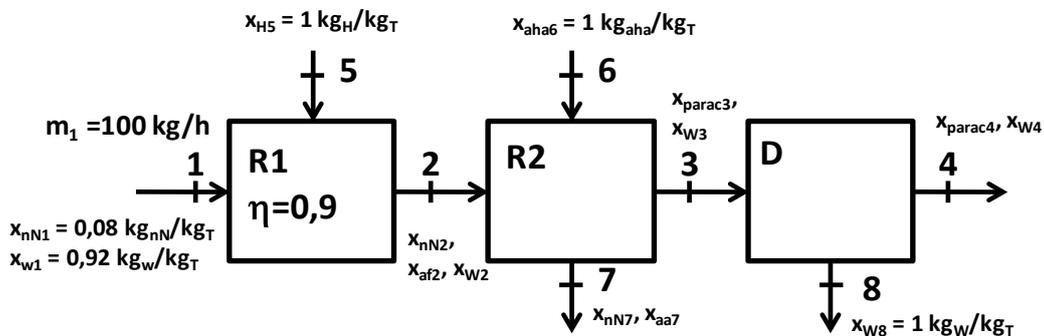


Figura 3. Diagrama de flujo del ejemplo de obtención de paracetamol

De acuerdo al enunciado, organizamos la información dada en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos conocidos del ejemplo de producción de paracetamol

| | Corrientes | | | | | | | |
|--|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| m (kg/h) | 100 | | | | | | | |
| x_{nN} (kg de nitrobenzono/kg totales) | 0,08 | | 0 | 0 | | | | 0 |
| x_w (kg de agua/kg totales) | 0,92 | | | 0,02 | | 0 | | 1 |
| x_{af} (kg de aminofenol/k totales) | | | | | | | 0 | |
| x_{aha} (kg de anhídrido acético/kg totales) | | | 0 | 0 | 0 | 1 | | |
| x_{aa} (kg ácido acético/kg totales) | 0 | 0 | | | | | | 0 |
| x_{parac} (kg paracetamol/kg totales) | | | | 0,98 | | 0 | | |
| x_H (kg de hidrógeno/kg totales) | | | 0 | 0 | 1 | | 0 | |

Para poder completar todas las celdas de esta tabla y así poder estimar composiciones y caudales de todas las corrientes del proceso, debemos plantear un sistema de ecuaciones basado en los balances de materia y en relaciones/restricciones impuestas en el caso de estudio. Con el fin de poder plantear el análisis de grados de libertad es necesario realizar previamente un estudio de variables independientes. Una manera sencilla de seleccionar estas variables es comenzar por indicar en una tabla (Tabla 2), la totalidad de variables del sistema.

Tabla 2. Variables del ejemplo de obtención de paracetamol

| Corrientes | Variables | | | | | | | | |
|------------|-----------|----------|-------|-------|----------|-------------|-----------|---------------------|---------------|
| 1 | m_1 | x_{nN} | x_w | | | | | Generaciones (kg/h) | G_{nN}^1 |
| 2 | m_2 | x_{nN} | x_w | | x_{af} | | | | G_H^1 |
| 3 | m_3 | | x_w | | | x_{parac} | | | G_{af}^1 |
| 4 | m_4 | | x_w | | | x_{parac} | | | G_w^1 |
| 5 | m_5 | | | x_H | | | | | G_{aha}^2 |
| 6 | m_6 | | | | | | x_{aha} | | G_{aa}^2 |
| 7 | m_7 | x_{nN} | | | | | x_{aa} | | G_{parac}^2 |
| 8 | m_8 | | x_w | | | | | | G_{af}^2 |

Siguiendo los pasos que hemos explicado anteriormente, eliminaremos del sistema de variables una fracción por corriente con más de un componente (corrientes 1, 2, 3, 4 y 7). En este caso, si elegimos el agua en todas las corrientes, excepto en la corriente 7 que no tiene, nos puede facilitar a posteriori la elección del balance a eliminar en el sistema de ecuaciones. Además, eliminaremos una generación por reacción. En este caso, consideraremos como variable dependiente la generación de agua en la primera reacción y el ácido acético en la segunda. De esta forma, en la tabla 2 se representan:

- En **negrita**, las variables conocidas.
- En **rojo**, las variables consideradas como variables dependientes, y por tanto que no se tienen en cuenta.
- En **violeta**, las generaciones de la primera reacción (con supraíndice 1), tachando la generación de agua (variable dependiente).
- En **verde**, los caudales de la segunda reacción (supraíndice 2), tachando la generación de ácido acético (variable dependiente).

¡Ahora ya TODAS las variables del sistema son independientes!

De la Tabla 2 se deduce que hay 17 variables independientes incógnitas ($m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7, m_8, x_{nN2}, x_{af2}, x_{parac3}, x_{nN7}, G_{nN}^1, G_H^1, G_{af}^1, G_{af}^2, G_{parac}^2, G_{aha}^2$) y 5 variables dependientes incógnitas ($x_{w2}, x_{w3}, x_{w4}, G_w^1, G_{aa}^2$)

Para poder plantear un sistema de ecuaciones compatible determinado, además de eliminar el balance de agua, tampoco han de considerarse las relaciones estequiométricas que implican términos de generación considerados como variables dependientes, tal y como se indica en rojo en la Tabla 3.

Tabla 3. Relaciones matemáticas de la estequiometría de las reacciones

| Reacción 1 | Reacción 2 |
|--|--|
| $\frac{G_{nN}^1}{123} = \frac{G_H^1}{2 \cdot 2}$ | $\frac{G_{af}^2}{109} = \frac{G_{aha}^2}{102}$ |
| $\frac{G_{nN}^1}{123} = \frac{G_{af}^1}{109}$ | $\frac{G_{af}^2}{109} = \frac{G_{parac}^2}{151}$ |
| $\frac{G_{nN}^1}{123} = \frac{G_w^1}{18}$ | $\frac{G_{af}^2}{109} = \frac{G_{aa}^2}{60}$ |

Por último, según el rendimiento de la reacción 1, sabemos que:

$$G_{nN}^1 = 0,9 \cdot m_1 \cdot X_{nN1}$$

Ahora, el sistema de ecuaciones ya es determinado y podemos resolverlo. Concretamente, va a estar compuesto por las ecuaciones que obtendremos en cada uno de los entornos del diagrama de flujo, y que se detallan a continuación:

Entorno Reactor 1. Datos: m_1 , X_{nN1} y X_{H5} . Incógnitas: m_2 , m_5 , X_{nN2} , X_{af2} , G_{nN}^1 , G_H^1 , G_{af}^1

- **Ecuación 1:** Balance de materia total: $m_2 = m_1 + m_5$
- **Ecuación 2:** Balance de nitrobenzeno: $m_2 X_{nN2} = m_1 X_{nN1} - G_{nN}^1$
- **Ecuación 3:** Balance de aminofenol: $m_2 X_{af2} = G_{af}^1$
- **Ecuación 4:** Balance de hidrógeno: $-m_5 X_{H5} = -G_H^1$
- **Ecuación 5:** Relación estequiométrica del nitrobenzeno y del hidrógeno de la Reacción 1: $4G_{nN}^1 = 123G_H^1$
- **Ecuación 6:** $109G_{nN}^1 = 123G_{af}^1$
- **Ecuación 7:** $G_{nN}^1 = 0,9 \cdot m_1 \cdot X_{nN1}$

Entorno Reactor 2. Dato: X_{aha6} . Incógnitas: m_2 , m_6 , m_7 , m_3 , X_{nN2} , X_{nN7} , X_{af2} , X_{parac3} , G_{af}^2 , G_{parac}^2 , G_{aha}^2

- **Ecuación 8:** Balance de materia total: $m_2 + m_6 = m_3 + m_7$
- **Ecuación 9:** Balance de nitrobenzeno: $m_2 X_{nN2} = m_7 X_{nN7}$
- **Ecuación 10:** Balance de aminofenol: $-m_2 X_{af2} = -G_{af}^2$
- **Ecuación 11:** Balance de anhídrido acético: $-m_6 X_{aha6} = -G_{aha}^2$
- **Ecuación 12:** Balance de paracetamol: $m_3 X_{parac3} = G_{parac}^2$
- **Ecuación 13:** Balance de ácido acético: $-m_7 (1 - X_{nN7}) = -G_{aa}^2 = -(G_{af}^2 + G_{aha}^2 - G_{parac}^2)$
- **Ecuación 14:** $102G_{af}^2 = 109G_{aha}^2$
- **Ecuación 15:** $151G_{af}^2 = 109G_{parac}^2$

Entorno del deshidratador. Dato: X_{parac4} . Incógnitas: m_3 , m_4 , m_8 y X_{parac3}

- **Ecuación 16:** Balance de materia total: $m_3 = m_4 + m_8$
- **Ecuación 17:** Balance de paracetamol: $m_3 X_{parac3} = m_4 X_{parac4}$

Entorno global. Datos: m_1 , X_{nN1} , X_{H5} , X_{aha6} y X_{parac4} . Incógnitas: m_2 , m_6 , m_4 , m_7 , m_8 , X_{nN7} , G_{af}^2 , G_{parac}^2 , G_{aha}^2 , G_{nN}^1 , G_H^1

- **Ecuación 18:** Balance de materia total: $m_1 + m_5 + m_6 = m_4 + m_8 + m_7$
- **Ecuación 19:** Balance de nitrobenzeno: $m_7 X_{nN7} - m_1 X_{nN1} + m_6 = -G_{nN}^1$
- **Ecuación 20:** Balance de hidrógeno: $-m_5 X_{H5} = -G_H^1$
- **Ecuación 21:** Balance de paracetamol: $m_4 X_{parac4} = G_{parac}^2$
- **Ecuación 22:** Balance de anhídrido acético: $-m_6 X_{aha6} = -G_{aha}^2$

- **Ecuación 23:** Balance de ácido acético: $-m_7 \cdot (1 - X_{nN7}) = -G_{aa} = -(G_{af} + G_{aha} - G_{parac})$
- **Ecuación 24:** Relación estequiométrica del nitrobenzono y del hidrógeno de la Reacción 1 $4G_{nN} = 123 G_{1H}$
- **Ecuación 25:** Relación estequiométrica del aminofenol y del paracetamol de la Reacción 2: $151G_{af} = 109G_{parac}$
- **Ecuación 26:** Relación estequiométrica del aminofenol y del anhídrido acético de la Reacción 2: $102G_{af} = 109G_{aha}$

En base a toda esta información podremos proceder a realizar el estudio de grados de libertad, que nos va a permitir averiguar el itinerario de cálculo.

4.3 Análisis de los grados de libertad

Habitualmente, los procesos industriales se conforman por un conjunto de etapas sucesivas que transforman las materias primas en el producto procesado para que el que se ha pensado el proceso, dando también lugar a diferentes corrientes de otros subproductos que hay que gestionar. Por ello, recurrir al análisis de grados de libertad puede ser de gran ayuda para saber si hay suficiente información para diseñar el proceso, así como para establecer una secuenciación de cálculo. Los grados de libertad (g.l.) se calculan así:

$$\text{Grados de libertad} = \Sigma \text{variables independientes} - \Sigma m \text{ y } x_i \text{ conocidas} - \Sigma \text{balances} - \Sigma \text{relaciones}$$

En función del valor obtenido, podremos decir que el sistema/etapa/entorno:

- Se puede resolver si los g.l.=0
- Falta información si los g.l.>0 y por tanto existen infinitas soluciones
- Hay demasiada información si los g.l.<0 por lo tanto, no tiene solución posible
- Se puede recurrir a una base de cálculo (en términos de caudal másico) si los g.l.=1 y siempre y cuando no haya ningún caudal fijado.

Se recomienda el manejo de una tabla (Tabla 4) para realizar el estudio de los grados de libertad. En ella, colocaremos en columnas cada etapa del proceso, así como el entorno global, que representarán los volúmenes de control sobre los que aplicaremos balances. Además, utilizaremos una columna adicional llamada proceso, que contemple toda la información de datos, variables y ecuaciones. Esta columna nos va a servir para saber si el sistema de ecuaciones tiene o no solución. En esa tabla, colocaremos en filas las variables independientes, los caudales, las generaciones y las fracciones másicas conocidas, los balances que se pueden plantear en cada caso y las posibles relaciones matemáticas (de estequiometrías, de rendimiento...), para poder calcular en la última fila los grados de libertad.

Tabla 4. Análisis de grados de libertad del ejemplo de producción de paracetamol

| | Reactor 1 | Reactor 2 | Deshidratador | Global | Proceso |
|-------------|-----------|-----------|---------------|----------|----------|
| var. Indep. | 10 | 12 | 6 | 18 | 23 |
| balances | 4 | 6 | 2 | 6 | 12 |
| m, G | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| x | 2 | 1 | 2 | 5 | 5 |
| relaciones | 3 | 2 | 0 | 5 | 5 |
| g.l. | 0 | 3 | 2 | 1 | 0 |

Para rellenar la columna del reactor 1, hemos contado de la Tabla 3 las variables independientes que serían: m_1 , m_2 , m_5 , x_{nN1} , x_{H5} , x_{nN2} , x_{af2} , G^{1nN} , G^{1H} , G^{1af} y que afectan a las corrientes 1, 2 y 5. En este entorno, podemos plantear cuatro balances: el balance de materia total, el de nitrobenzeno, el de hidrógeno y el de anhídrido acético. Además, conocemos m_1 y x_{nN1} . Respecto a las relaciones, consideraremos las dos relaciones indicadas en la Tabla 3 que relacionan el nitrobenzeno con el hidrógeno y con el anhídrido acético, así como la relación del rendimiento de la operación. Para el resto de entornos se procedería igual.

En la columna correspondiente al proceso, se tienen en cuenta todas las variables independientes de todo el proceso. Respecto a los balances, se suman los que hay en cada casilla de cada entorno, excepto para el entorno global. Las variables conocidas también son las independientes de todo el proceso (Tabla 2), así como las relaciones (Tabla 3). Como en la columna de proceso se obtienen 0 grados de libertad, sabemos que está bien planteado el problema ya que tendrá una única solución. Además, el primer entorno a resolver sería el reactor 1 puesto que tiene 0 grados de libertad. Una vez resuelto el entorno 1, se obtendrán los valores de las variables que permitirán recalcular los grados de libertad de los otros entornos de forma secuencial (Tabla 5) hasta obtener todas las incógnitas del proceso (Tablas 6 y 7).

Tabla 5. Itinerario de cálculo basado en el análisis de grados de libertad

| Reactor 1 | Reactor 2 | Deshidratador |
|--|--|---|
| <p>1º) G^{1nN} de la ec. 7</p> <p>2º) G^{1H} de la ec. 5</p> <p>3º) G^{1af} de la ec. 6</p> <p>4º) m_5 de la ec. 4</p> <p>5º) m_2 de la ec. 1</p> <p>6º) x_{af2} de la ec. 3</p> <p>7º) x_{nN2} de la ec. 2</p> <p>Además:</p> $G^1_w = G^{1nN} + G^{1H} - G^{1af} X_{w2} = 1 - X_{af2} - x_{nN2}$ <p>Sabiendo m_2, x_{nN2} y x_{af2}, podemos resolver el reactor 2. Asimismo, se han obtenido G^{1nN}, G^{1H}, G^{1af} y m_5</p> | <p>8º) G^{2af} de la ec.10</p> <p>9º) G^{2aha} de la ec.14</p> <p>10º) G^{2parac} de la ec.15</p> $G^{1aa} = G^{2af} + G^{2aha} - G^{2parac}$ <p>11º) m_6 de la ec. 11</p> <p>12º y 13º) m_7 y x_{nN7} resolviendo el sistema formado por las ec.9 y 13</p> <p>ec. 9: $m_7 = \frac{m_2 \cdot x_{nN2}}{x_{nN7}}$</p> <p>ec. 13: $m_7 = \frac{G_{aa}^2}{1 - x_{nN7}}$</p> <p>Igualando ambas:</p> $x_{nN7} = \frac{m_2 x_{nN2}}{(G_{aa}^2 + m_2 x_{nN2})}$ <p>14º) m_3 de la ec. 8</p> <p>15º) x_{parac3} de la ec. 12</p> $X_{w3} = 1 - X_{parac} \text{ y } X_{aa7} = 1 - x_{nN7}$ <p>Sabiendo m_3 y x_{parac3} podemos resolver el deshidratador. Asimismo, se han obtenido m_7, m_6, x_{nN7} y $G^{2af} + G^{2aha} - G^{2parac}$</p> | <p>16º) m_4 de la ec. 17</p> <p>17º) m_8 de la ec. 16</p> |

Resolviendo los entornos oportunos se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 6. Resultados de caudales y composiciones del ejemplo de obtención de paracetamol.

| | CORRIENTES | | | | | | | |
|---|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| m (kg/h) | 100 | 102,7 | 121,8 | 103,7 | 2,7 | 68,7 | 49,6 | 18,0 |
| x_{nN} (kg de nitrobenzeno/kg totales) | 0,92 | 0,090 | 0 | 0 | | | 0,186 | 0 |
| x_w (kg de agua/kg totales) | 0,08 | 0,196 | 0,165 | 0,02 | | 0 | | 1 |
| x_{af} (kg de aminofenol/k totales) | | 0,715 | | | 0 | | 0 | |
| x_{aha} (kg de anhídrido acético/kg totales) | | | 0 | 0 | | 1 | | |
| x_{aa} (kg ácido acético/kg totales) | 0 | 0 | | | | | 0,814 | 0 |
| x_{parac} (kg paracetamol/kg totales) | | | 0,835 | 0,98 | | 0 | 0 | |
| x_H (kg de hidrógeno/kg totales) | | | 0 | 0 | 1 | | 0 | |

En rojo se indican los datos

Tabla 7. Resultados de las generaciones del ejemplo de paracetamol.

| | | | |
|--|------|---|-------|
| G¹_{nN} (kg/h) | 82,8 | G²_{af} (kg/h) | 73,4 |
| G¹_H (kg/h) | 2,7 | G²_{aha} (kg/h) | 68,7 |
| G¹_{af} (kg/h) | 73,4 | G²_{parac} (kg/h) | 101,6 |
| G¹_w (kg/h) | 12,1 | G²_{aa} (kg/h) | 40,4 |

5 Cierre

A lo largo de este objeto de aprendizaje, hemos aprendido a **obtener los caudales y composiciones** de las diferentes corrientes implicadas en un proceso industrial en el que tienen lugar reacciones químicas, bioquímicas o microbiológicas. Para ello, hemos hecho **uso de los balances de materia con generación y en régimen estacionario**. Además, hemos sido capaces de plantear la resolución secuencial de las ecuaciones del sistema mediante el análisis de los **grados de libertad**, herramienta de gran utilidad práctica.

6 Bibliografía

Díaz, M. (2012). Ingeniería de bioprocesos. Edición Paraninfo

Aguado, J., Calles, J., Cañizares, P., López, B., Santos, A., Serrano, D., & Rodríguez, F. (1999). Ingeniería de la Industria Alimentaria Volumen I. Ed. Síntesis

Ibarz, A. y Barbosa-Canovas G.V. (2005). Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Ed. Mundi-Prensa

Singh, P. y Heldman (2014). Introduction to Food Engineering (Fifth Edition). Ed. Elsevier