



Resolución de casos prácticos de extracción sólido-líquido con disolvente nuevo mediante el diagrama triangular-rectangular

Apellidos, nombre	Castelló Gómez, Marisa (mcasgo@upv.es) Fito Suñer, Pedro (pedfisu@tal.upv.es) Betoret Valls, Noelia (noebeval@tal.upv.es) Seguí Gil, Lucía (lusegil@upvnet.upv.es)
Departamento	Departamento de Tecnología de Alimentos
Centro	Universitat Politècnica de València

1 Resumen

En este artículo vamos a presentar los **pasos básicos** que hay que tener en cuenta a la hora de **diseñar una operación básica de extracción sólido-líquido con disolvente nuevo utilizando el diagrama triangular-rectangular**. Así, podremos estimar la cantidad necesaria de disolvente y/o el número de etapas necesarias para alcanzar un determinado rendimiento de extracción.

2 Introducción

La extracción sólido-líquido (S-L) es una operación básica que tiene como finalidad transferir un componente de interés (**soluto**) contenido en una corriente de alimento sólido (corriente de **refinado**, R_0) a una corriente líquida de disolvente (corriente de **extracto**, E_0) con una elevada afinidad por el soluto. Al finalizar la extracción se obtiene una corriente sólida de **alimento agotado o residuo** (corriente de **refinado**, R_1) con disolución retenida en él, y una corriente líquida integrada por el disolvente y el soluto extraído (corriente de **extracto**, E_1) (Figura 1). Aquella parte del refinado que es insoluble en el disolvente empleado recibe el nombre de **inerte**.



Figura 1. Esquema de las corrientes involucradas en una etapa de extracción sólido-líquido.

La composición de las corrientes se simplifica a tres componentes: soluto (S), disolvente (D) e inerte (I). La fracción másica de cada uno de estos componentes en la fase líquida o extracto se representará como y_i , y en la fase sólida o refinado como x_i . Siendo i el componente considerado en cada caso.

Según el porcentaje de extracción requerido, la operación puede llevarse a cabo por contacto simple (en una única etapa) o múltiple (varias etapas). En la extracción múltiple puede utilizarse disolvente nuevo en cada etapa o hacer circular las corrientes de refinado y extracto en condiciones de contracorriente (Figura 2).

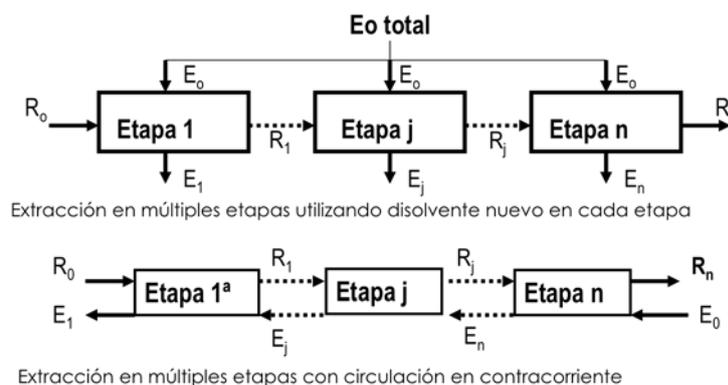


Figura 2. Esquema de circulación de las corrientes en la extracción múltiple.



El uso del **diagrama triangular-rectangular** permite establecer un método gráfico de resolución de las operaciones de extracción en una o múltiples etapas. Este método de resolución considera cada una de las etapas como etapas ideales en las que las corrientes de salida están en equilibrio. Se trata de etapas de contacto en las que la disolución que se obtiene (fase líquida) tiene la misma composición que la disolución retenida por el sólido o refinado final.

3 Objetivos

Una vez leas con detenimiento este objeto de aprendizaje podrás:

- Conocer las principales propiedades del diagrama triangular-rectangular, y su aplicación en la resolución de una operación de extracción por contacto simple.
- Utilizar el método gráfico para calcular los caudales y composiciones de las corrientes involucradas en una extracción múltiple en n etapas utilizando disolvente nuevo en cada etapa.
- Utilizar el método gráfico para estimar el número de etapas ideales necesarias para conseguir un determinado rendimiento en una extracción múltiple utilizando disolvente nuevo en cada etapa.

4 Desarrollo

El método gráfico de resolución de las operaciones de extracción se basa en la representación en el diagrama triangular-rectangular de:

- **Los balances de materia** que relacionan los caudales y las composiciones de las corrientes implicadas en una etapa de extracción.
- **La curva de retención** o lugar geométrico de puntos que representan las composiciones de todas las corrientes de refinado que se van obteniendo en un proceso de extracción.
- **La relación de equilibrio o recta de reparto** que establece la igualdad en la proporción másica soluto/disolvente entre las corrientes de extracto y refinado que resultan de una etapa ideal.

4.1 Contacto simple. Extracción en una única etapa

En la Figura 3 se han representado los caudales y las composiciones de todas las corrientes implicadas en una extracción por contacto simple. Se define una **corriente mezcla** cuyo caudal M viene dado por la suma de los caudales de las corrientes de entrada o de salida. Las fracciones másicas de los componentes de esta corriente se representan como z_i , siendo i el componente considerado (soluto, disolvente o inerte). En la figura se han incluido las ecuaciones correspondientes a los balances de masa total, soluto y disolvente (3 ecuaciones de balance linealmente independientes de las 4 posibles).

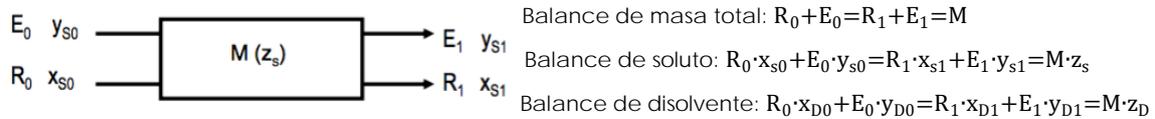


Figura 3. Caudales y composiciones de todas las corrientes implicadas en una extracción por contacto simple.

A continuación, veremos los pasos a seguir para obtener los caudales y la composición de las corrientes utilizando el diagrama triangular-rectangular.

Primer paso: Ubicación en el diagrama triangular de los puntos que representan las composiciones de las corrientes de entrada R_0 , E_0 y de la corriente mezcla M_1 (Figura 4).

En el diagrama triangular-rectangular se representan fracciones másicas de soluto (cateto horizontal correspondiente al eje de abscisas), de disolvente (cateto vertical correspondiente al eje de ordenadas) y de inerte (eje perpendicular a la hipotenusa que une esta con el origen de coordenadas). Conocidas las fracciones másicas de dos de los tres componentes, podremos situar el punto que representa la composición de la corriente considerada.

Hemos de tener en cuenta que, normalmente, los puntos que representan la composición de las corrientes de refinado estarán situados dentro del área del triángulo. En caso de que la corriente de refinado inicial no contenga disolvente, el punto correspondiente estará situado sobre el eje de abscisas. Por otra parte, las corrientes de extracto nunca van a contener inerte, dado que se trata de una corriente de fase líquida, por lo que los puntos de estas corrientes siempre estarán situados sobre la hipotenusa del triángulo. En caso de que la corriente de extracto inicial sea disolvente puro, el punto que representa la composición de esta corriente se situará en el vértice superior del triángulo.

Para situar el punto que representa la composición de la corriente mezcla (M_1) hemos de tener en cuenta que el diagrama triangular-rectangular cumple con la Ley de la Palanca. De acuerdo con ésta, el punto correspondiente a una corriente que es mezcla de otras dos, estará sobre la recta que une los puntos de las corrientes que se mezclan y la posición exacta dependerá de la proporción de mezcla. Para el caso que nos ocupa, la forma más sencilla de proceder será situar M_1 sobre la recta $\overline{R_0 E_0}$ a partir de la composición z_s calculada utilizando las ecuaciones del balance de masa total y del balance de soluto.

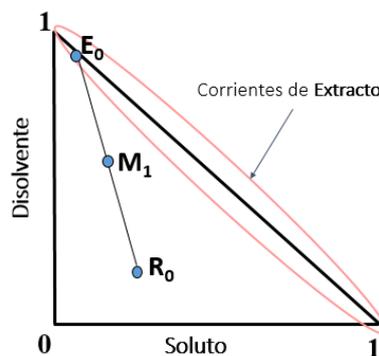


Figura 4. Ejemplo de ubicación en el diagrama triangular-rectangular de las corrientes de entrada y la corriente mezcla implicadas en una etapa de extracción por contacto simple.

Segundo paso: Representación en el diagrama triangular-rectangular de la curva de retención (Figura 5).

Para poder continuar trabajando con el diagrama, debemos entender el concepto de **curva de retención**. Podemos definir la curva de retención como el lugar geométrico de puntos que representan la composición de las corrientes de refinado que resultan de una etapa de extracción en la que se alcanza el equilibrio. Se trata de una curva experimental que depende de la naturaleza de las corrientes que se mezclan, y de la forma y condiciones en que se lleve a cabo el proceso de extracción. Sin embargo, en muchas ocasiones, la curva de retención puede simplificarse mediante una de las dos ecuaciones siguientes:

- Retención constante de disolución: $\frac{x_S+x_D}{x_I} = \text{cte}$
- Retención constante de disolvente: $\frac{x_D}{x_I} = \text{cte}$

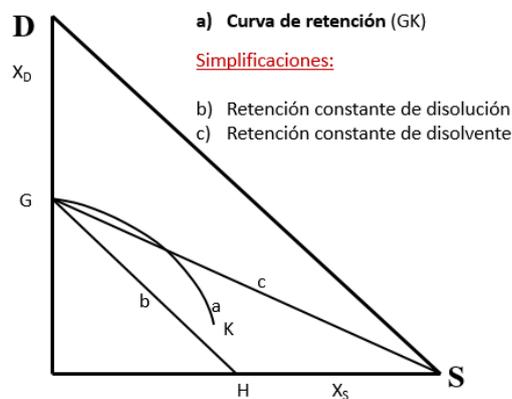


Figura 5. Representación de los diferentes tipos de curva de retención en el diagrama triangular-rectangular.

Nota: Los pasos 1 y 2 se pueden intercambiar en el orden de realización

Veamos un ejemplo. Si nos dicen que en un proceso de extracción de aceite se ha establecido en ensayos previos que el refinado final retiene 0,5 kg de disolución por cada kg de sólido inerte, observándose que dicha relación se mantiene constante independientemente de la composición de la disolución, ¿cómo dibujarías la curva de retención en el diagrama triangular?

Según la información aportada, la curva de retención sería una recta paralela a la hipotenusa (caso b). Sabemos que:

$$\frac{x_S+x_D}{x_I} = 0,5 \qquad x_S+x_D+x_I=1$$

Con este sistema de 2 ecuaciones vamos a determinar el punto de corte de la curva de retención con cada uno de los ejes del diagrama triangular-rectangular. Así, en el eje Y, $x_S=0$ y el sistema de ecuaciones se simplificará, teniendo ahora sólo 2 incógnitas (x_D y x_I). Resolviéndolo, veréis que la $x_D=0,333$ kg de disolvente/kg refinado. Procediendo igual, pero en el eje X, comprobaréis que la $x_S=0,333$ kg de soluto/kg de refinado. En la siguiente figura os mostramos cómo se representaría esta curva de retención

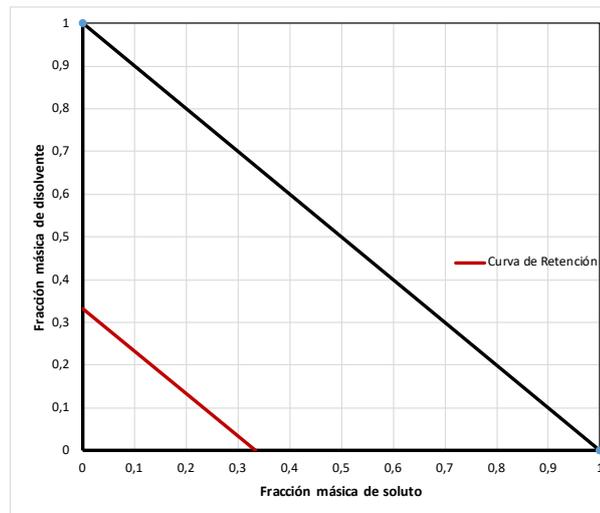


Figura 6. Representación de la curva de retención del ejemplo en el diagrama triangular-rectangular.

Tercer paso: Ubicación en el diagrama triangular de los caudales de salida R_1 y E_1 (figura 7).

De acuerdo con la definición de curva de retención, el punto que representa la composición de la corriente R_1 siempre estará sobre esta curva. Además, como la corriente de extracto E , generalmente, no contiene inerte, el punto que la representa estará sobre la hipotenusa.

También hemos visto en los balances descritos en la Figura 1, que la corriente mezcla M_1 se encontrará sobre la recta que une los puntos E_0 y R_0 , y al mismo tiempo sobre la recta que une los puntos E_1 y R_1 .

Por otra parte, ya hemos dicho que se admite que en todas las etapas se alcanza el equilibrio, de tal manera que E_1 y R_1 cumplen la relación de equilibrio según la cual la proporción másica soluto/disolvente es la misma en las dos corrientes. Teniendo en cuenta las propiedades del diagrama triangular, esta relación la cumplirán los puntos de cualquier recta que una el origen de coordenadas con un punto de la hipotenusa.

De acuerdo con las premisas expuestas, conociendo la ubicación de la corriente mezcla M_1 , uniremos dicho punto con el origen y prolongamos la recta resultante hasta la hipotenusa. El corte con la hipotenusa corresponderá a la corriente E_1 , mientras que el corte con la curva de retención nos dará el punto R_1 . Situados los puntos que representan la composición de las dos corrientes, podemos leer directamente la fracción másica de soluto y disolvente, y obtener la de inerte por diferencia con la unidad.

Habitualmente, con una sola etapa de extracción se obtiene un bajo grado de recuperación de soluto. Para aumentar el rendimiento de extracción la operación puede llevarse a cabo por contacto múltiple. A continuación, se explicará el procedimiento gráfico de resolución para un proceso con múltiples etapas en el que se utiliza disolvente nuevo en cada una de ellas.

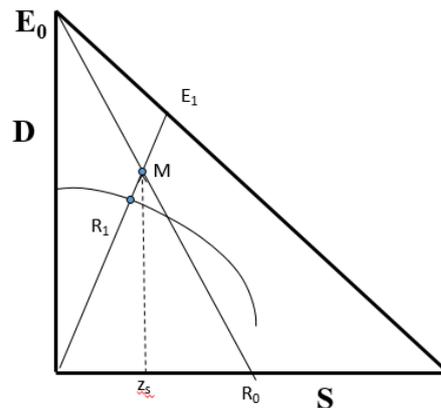


Figura 7. Ubicación en el diagrama triangular-rectangular de las corrientes de salida de una etapa de extracción por contacto simple.

4.2 Extracción múltiple con disolvente nuevo en cada etapa

La Figura 8 muestra el diagrama de flujo de una operación de extracción con n etapas y en la que se añade disolvente nuevo a cada una de las etapas. En el diagrama se ha considerado que el caudal de disolvente que se utiliza en cada etapa es el mismo, ya que es en esta situación en la que se obtienen mejores rendimientos.

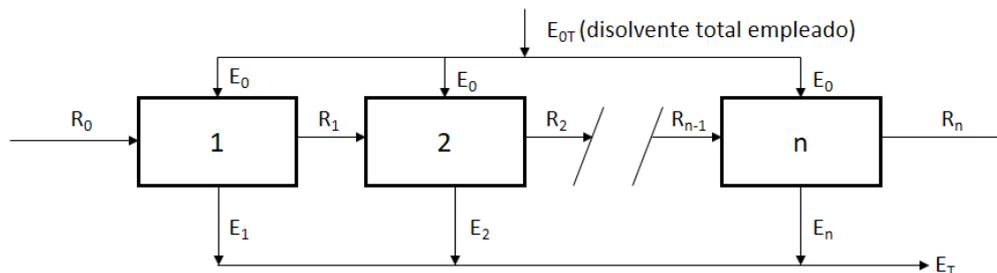


Figura 8. Diagrama de flujo de una operación de extracción con disolvente nuevo en cada etapa-

El cálculo de una operación como esta se realiza etapa por etapa, planteando en cada una de ellas los balances de masa correspondientes, la relación de equilibrio entre las corrientes de salida y el concepto de curva de retención. Una vez resuelta la etapa 1 como si de un contacto simple se tratara, las siguientes se resolverán de la misma forma, pero considerando que la corriente de refinado inicial es la corriente que sale de la etapa anterior.

En el cálculo de estas operaciones nos podemos encontrar con diferentes situaciones, siendo las más comunes las siguientes:

- **Caso 1.** Conociendo la cantidad de disolvente total empleado y la composición de las corrientes de entrada E_0 y R_0 ¿qué concentración de solutos tendrán las corrientes de refinado final (x_{sn}) tras realizar n etapas de extracción?
 1. Calcular el caudal de disolvente que se emplea en cada etapa:

$$E_0 = \frac{E_{0\text{ TOTAL}}}{n}$$
 2. RESOLUCIÓN DE LA ETAPA 1:
 - a. Situar los puntos que representan la composición de las corrientes R_0 y E_0 en el diagrama triangular-rectangular.
 - b. Dibujar la curva de retención en el diagrama.



- c. Situar M_1 (calculamos su composición z_s mediante las ecuaciones de balance) sobre la recta $\overline{R_0E_0}$.
 - d. Unir M_1 con el origen, prolongar esta recta hasta la hipotenusa y situar E_1 en la intersección de esta recta con la hipotenusa y R_1 en la intersección con la curva retención.
 - e. Calcular los caudales de las corrientes R_1 y E_1 mediante la resolución analítica de los balances de masa.
3. RESOLUCIÓN DE LA ETAPA 2:
- a. Plantear balances considerando R_1 y E_0 como las corrientes de entrada a la segunda etapa, obtener z_{s2} .
 - b. Situar M_2 sobre recta de unión de $\overline{R_1E_0}$.
- (...) continuar siguiendo el procedimiento descrito para una operación por contacto simple.

Y así, sucesivamente, hasta llegar a la etapa n que nos permitiría situar R_n y E_n en el diagrama triangular-rectangular, pudiendo conocer las composiciones de estas corrientes.

- **Caso 2.** Conociendo la cantidad de disolvente empleado en cada etapa y la composición de las corrientes de entrada E_0 y R_0 , ¿cuántas etapas (n) se requerirán para conseguir una extracción determinada, es decir, para que el refinado final salga con un determinado contenido en soluto?

Procederemos de la misma forma que en el caso 1, añadiendo etapas hasta que la corriente de refinado final tenga una fracción másica de soluto igual o inferior a la deseada.

- **Caso 3.** Conociendo la cantidad total de disolvente empleado y la composición de las corrientes de entrada E_0 y R_0 , ¿cuántas etapas (n) se requerirán para conseguir una extracción determinada, es decir, para que el refinado final salga con un determinado contenido en soluto?

1. Suponer un número de etapas y calcular el caudal de disolvente que se emplea en cada etapa:

$$E_0 = \frac{E_0 \text{ TOTAL}}{n}$$

2. Proceder igual que en caso 2
 3. Si para el n° de etapas supuesto, la composición de R_n coincide con la especificada, el problema ya estaría resuelto. Si no, habría que suponer otro número de etapas y comenzar de nuevo.
- **Caso 4.** Conociendo lo indicado en los casos 2 ó 3, pero facilitándose el rendimiento de la extracción en lugar de la composición del refinado final.

En este caso será necesario calcular la composición del refinado final (x_{sn}) a partir del rendimiento facilitado (η). Este cálculo se realiza aplicando el concepto de refinado desolventizado (R_n'), que no se tratará en este objeto de aprendizaje.

Veamos un ejemplo. Una harina de pescado posee un contenido en aceite del 40% en peso. La extracción de dicho aceite se va a llevar a cabo mediante una cascada de etapas en serie que se alimentará con una corriente de 1000 kg/h de harina de pescado. Se desea que en el refinado final el contenido de aceite sea como máximo de un 9%. La extracción se realizará utilizando ciclohexano como disolvente, y utilizando un caudal de 200 kg/h del mismo en cada etapa. La cantidad de disolución retenida



por el sólido se mantiene constante en todo el proceso y es de 0,55 kg disolución/kg inerte. El sólido inerte es totalmente insoluble y se separa completamente de la disolución una vez realizada la separación de fases en cada etapa. Determinar:

- El número de etapas ideales necesarias
- Caudal y composición de las corrientes de extracto y refinado que salen de cada una de las etapas

Resolución

1º Dibujar la curva de retención en el diagrama triangular. En este caso sería una recta paralela a la hipotenusa, siendo el punto de corte con el eje X ($x_S=0,355$, $x_D=0$) y con el eje Y ($x_S=0,355$, $x_D=0$)

2º Representar en el diagrama los puntos que representan la composición de las corrientes de la harina de pescado (R_0) ($x_{S0}=0,4$, $x_D=0$) y del disolvente (E_0) ($y_{S0}=0$, $y_{D0}=1$)

3º Plantear los balances de masa total y de soluto para poder situar la corriente mezcla 1 (M_1) sobre la recta que une las corrientes E_0 y R_0

$$R_0 + E_0 = R_1 + E_1 = M_1 = 1200 \text{ kg/h}$$

$$R_0 x_{S0} + E_0 y_{S0} = R_1 x_{S1} + E_1 y_{S1} = M_1 z_{S1}, \text{ obteniendo que } z_{S1} = 0,3333$$

$$R_0 x_{D0} + E_0 y_{D0} = R_1 x_{D1} + E_1 y_{D1} = M_1 z_{D1}, \text{ obteniendo que } z_{D1} = 0,1666$$

4º Trazaremos la primera recta de reparto que representa la relación de equilibrio entre las corrientes E_1 y R_1 que salen de la primera etapa. Para ello, uniremos el origen de coordenadas con el punto que representa la composición de la corriente M_1 y prolongaremos la recta hasta que corte a la hipotenusa. Así, ubicaremos la corriente de refinado (R_1) de la primera etapa sobre la curva de retención y la corriente de extracto de esta etapa (E_1) sobre la hipotenusa. De esta manera obtenemos que $x_{S1}=0,235$, $x_{D1}=0,12$, $y_{S1}=0,66$, $y_{D1}=0,34$.

5º Sabiendo la composición de las corrientes E_1 y R_1 , podemos calcular los caudales R_1 y E_1 mediante las ecuaciones de balance:

$$E_1 + R_1 = 1200$$

$$E_1 \cdot 0,12 + R_1 \cdot 0,235 = 1200 \cdot 0,3333$$

Resolviendo este sistema, obtenemos: $E_1 = 277 \text{ kg/h}$, $R_1 = 923 \text{ kg/h}$

Teniendo en cuenta que la fracción másica de soluto de la corriente R_1 es superior a la deseada ($x_{Sn}=0,09$), podemos decir que con una única etapa de extracción no es suficiente. Necesitamos incluir más etapas de extracción.

6º Resolvemos la segunda etapa de extracción repitiendo los pasos 3º, 4º y 5º pero ahora tomando como corriente alimento R_1 .

$$E_0 + R_1 = M_2 = E_2 + R_2$$

$$E_0 y_{S0} + R_1 x_{S1} = M_2 z_{S2} = E_2 y_{S2} + R_2 x_{S2}$$

$$E_0 y_{D0} + R_1 x_{D1} = M_2 z_{D2} = E_2 y_{D2} + R_2 x_{D2}$$

Resolviendo este sistema obtendremos que:

$$z_{S2} = 0,193, z_{D2} = 0,277, x_{S2} = 0,145, x_{D2} = 0,215, y_{S2} = 0,42, y_{D2} = 0,58, E_2 = 196,4 \text{ kg/h y } R_2 = 926 \text{ kg/h y } M_2 = 1122,35 \text{ kg/h}$$

Puesto que la fracción másica de solutos en la corriente de refinado de la etapa 2 sigue siendo superior a la exigida en el caso de estudio, habría que realizar otra etapa de extracción.

6º Resolvemos la tercera etapa de extracción tomando como corriente alimento R_2 . Seguimos el procedimiento gráfico que ya conocemos y calculamos caudales con las correspondientes ecuaciones de balance:

$$E_0 + R_2 = M_3 = E_3 + R_3$$

$$E_0 y_{S0} + R_2 x_{S2} = M_3 z_{S3} = E_3 y_{S3} + R_3 x_{S3}$$

$$E_0 y_{D0} + R_2 x_{D2} = M_3 z_{D3} = E_3 y_{D3} + R_3 x_{D3}$$

Resolviendo este sistema obtendremos que:

$z_{s3}=0,119$, $z_{D3}=0,354$, $x_{s3}=0,08$, $x_{D3}=0,265$, $y_{s3}=0,255$, $y_{D3}=0,745$ $E_3=252,5$ kg/h y $R_3=873,45$ kg/h y $M_3=1126$ kg/h

Puesto que x_{s3} es menor que el valor establecido en el enunciado, con tres etapas ideales sería suficiente para hacer una buena extracción del aceite de esta harina de pescado (Figura 9). Conociendo la eficacia de la operación, podríamos obtener las etapas reales (número de etapas reales=número de etapas ideales/eficacia).

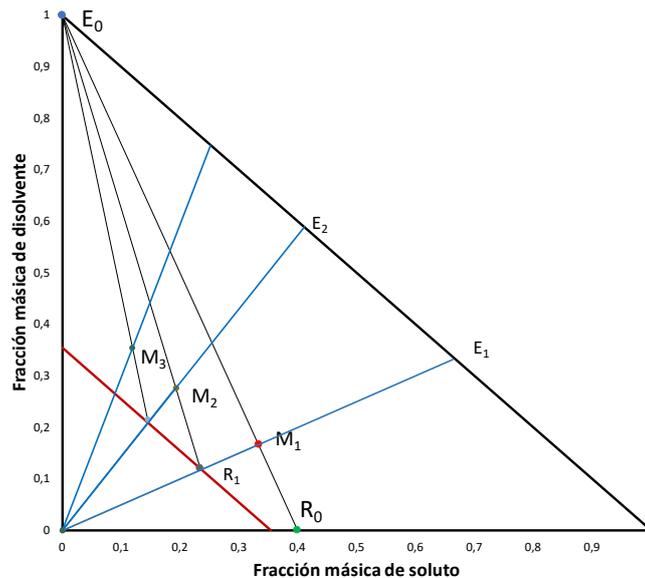


Figura 9. Resolución gráfica utilizando el diagrama triangular de las corrientes del ejemplo de extracción de aceite de harina de pescado. En rojo se ha trazado la curva de retención. En azul se representan las rectas de reparto que hacen referencia al número de etapas ideales de extracción.

5 Cierre

A lo largo de este objeto de aprendizaje hemos aprendido a utilizar el diagrama triangular- rectangular para resolver operaciones de extracción por contacto simple y por contacto múltiple utilizando disolvente nuevo en cada etapa. Hemos visto un caso práctico de aplicación para el cálculo del número de etapas necesarias para conseguir una determinada extracción. Con estas directrices, ya estáis listos para el diseño de este tipo de operaciones. ¡¡Ánimo!!

6 Bibliografía

Aguado, J., Calles, J., Cañizares, P., López, B., Santos, A., Serrano, D., & Rodríguez, F. (2010). Ingeniería de la Industria Alimentaria Volumen II. Ed. Síntesis.

Ibarz, A., & Barbosa-Cánovas (2005). Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Ed. Mundi-Prensa Libros.

Seguí, L. (2014). Aplicación del Diagrama Triangular Rectangular a la Resolución de Problemas de Extracción Sólido-Líquido. Polimedia.
<http://www.upv.es/visor/media/20b553b8-bcc6-494e-9907-99b2b386f9b0/v>