



Resolución analítica de balances de materia mediante Matlab

Apellidos, nombre	Fombuena Borràs, Vicent (vifombor@upv.es) Cardona Navarrete, Salvador C. (scardona@iqn.upv.es) Domínguez Candela, Iván (ivdocan@doctor.upv.es)
Departamento	Departamento de Ingeniería Química y Nuclear (DIQN)
Centro	Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA) Universitat Politècnica de València (UPV)

1 Resumen de las ideas clave

Los balances de materia y energía son herramientas que están constantemente presentes tanto en la formación del alumnado como en el ámbito profesional del futuro ingeniero químico. En cualquier proceso de ingeniería química es necesario deducir información de las variables desconocidas, siendo una de las herramientas más importantes que debéis conocer.

Los balances de materia en régimen estacionario se basan en ecuaciones algebraicas que debéis resolver, siendo más complejas cuanto mayor es la complejidad del proceso químico a estudiar. De esta forma, se crea la necesidad de la resolución de dichas ecuaciones mediante software informático. Esto permite que os centréis en la resolución del problema y no en su complejidad matemática, utilizándose para ello la herramienta que nos proporcionan las universidades como es el caso de Matlab.

Una de las problemáticas de los softwares matemáticos es la complejidad que puedan mostrar. Para ello, os mostraremos cómo utilizar una plantilla con la que resolver los balances planteados. Durante el proceso, os guiaremos en la aplicación de una metodología para la correcta implementación de las ecuaciones, permitiendo un mayor éxito en la resolución del problema. Habitualmente se realizan cálculos numéricos, pero es interesante que también tengáis la habilidad de obtener una resolución analítica que os permita conocer la relación que presentan las variables desconocidas con parámetros especificados. Por tanto, en este artículo podréis ser capaces de resolver de forma analítica un proceso de ósmosis inversa definido por balances de materia.

2 Introducción

En el campo de la ingeniería química, una de las herramientas indispensables para cualquier profesional y alumno, son los balances de materia y energía. Mediante estos balances, podéis resolver las variables involucradas en cualquier proceso químico, sin importar si ocurren o no reacciones químicas, si es en estado estacionario, no estacionario, procesos adiabáticos, etc. Estos modelos, en régimen estacionario, se basan en ecuaciones algebraicas que permiten resolver incógnitas de un proceso como serían las composiciones de salida, la temperatura, velocidades de reacción, etc.

Este sistema de ecuaciones algebraicas suele presentar cierta complejidad, pudiendo ser lineales o no lineales. Además, si se analiza un proceso químico más complejo y se incrementa el número de incógnitas y ecuaciones, la resolución comienza a presentar una gran dificultad añadida. Por ese motivo, es necesario emplear herramientas informáticas que faciliten estas resoluciones y, a ser posible, sean sencillas de utilizar por vosotros. Sin embargo, en muchas situaciones no presentáis suficiente conocimiento en programación informática o en métodos numéricos, por lo que los docentes nos limitamos a explicar procesos químicos más sencillos. Esto hecho conlleva a realizarnos la siguiente pregunta: **¿realmente es lo que deberíamos realizar como docentes o la finalidad principal es prepararos para el mundo real haciendo que planteéis problemas más complejos?** Lo conveniente es analizar procesos químicos que se ajusten lo más cerca a la realidad, a pesar de que el modelado sea más complejo. Entonces, **¿cómo os podemos facilitar la resolución de las ecuaciones algebraicas?** Una propuesta sería la realización de una plantilla en un software determinado.

Uno de los softwares matemáticos más utilizados y potentes es **Matlab**. Independientemente del software utilizado, es posible obtener los mismos resultados,



siendo la diferencia principal tanto el lenguaje escrito como los plugins disponibles. Una de las tareas del docente es facilitar herramientas para la resolución de ecuaciones algebraicas complejas, eliminando de esta forma la barrera matemática que tanto os atormenta. Una plantilla bien estructurada y que permita guiaros es un avance muy importante para que solo tengáis que centraros en el análisis del proceso. En la época en la que nos encontramos, los programas matemáticos tienen suficiente potencial para la resolución de problemas, pero es necesario un previo análisis del sistema. Como futuros ingenieros tendréis como tarea el análisis de procesos químicos y, por ese motivo, es necesario que conozcáis un método de resolución metodológico y estructurado de fácil entendimiento. De esta forma solo deberéis centraros en el aspecto ingenieril y no tanto en cómo resolver matemáticamente el problema.

Respecto a las soluciones obtenidas tras la resolución de las ecuaciones algebraicas de procesos químicos, es posible obtener soluciones numéricas o analíticas. En la gran mayoría de las situaciones se desea conocer el valor numérico de una determinada variable, como podría ser la composición en la salida de un reactor. Sin embargo, **¿cómo es posible que conozcáis la influencia de una determinada variable en la composición de salida del reactor?** Esto podría conocerse si en lugar de haber realizado un análisis numérico, se hubiera realizado el analítico. La resolución analítica da como resultado ecuaciones simbólicas que permiten determinar relaciones entre las variables desconocidas del problema con parámetros especificados. Por tanto, en ciertas situaciones sería interesante ver dichas relaciones en forma simbólica y no en forma numérica, donde únicamente vemos el resultado final (un valor numérico para cada variable).

A lo largo del artículo os facilitamos una metodología para la resolución de ecuaciones algebraicas de un determinado proceso químico. Este trabajo se centrará en un fichero principal llamado "**plantilla_BM.m**" en el que introduciréis las ecuaciones algebraicas y variables necesarias para la resolución. Por otro lado, haréis uso del fichero "**steady_state_balance_solver.m**" que será el que os permite resolver las ecuaciones introducidas en "plantilla_BM.m". Los ficheros comentados están a vuestra disposición poniéndoos en contacto con nosotros.

3 Objetivos

Una vez realizada la lectura del artículo, seréis capaces de:

- Deducir balances de materia para un proceso de ósmosis inversa en estado estacionario.
- Aplicar una metodología clara y estructurada para la resolución analítica de balances de materia en estado estacionario mediante la plantilla de Matlab.
- Analizar en qué situaciones es posible o no obtener una solución analítica en función de la información proporcionada por Matlab.

4 Desarrollo

A continuación, plantearemos el balance de materia de un ejercicio propuesto. Durante el planteamiento os proporcionaremos una metodología para poder obtener una resolución analítica mediante Matlab, además de plantear y resolver las preguntas que os podéis realizar durante la resolución. Se debe recalcar que los ficheros que se emplearán son: **steady_state_balance_solver.m** y **plantilla_BM.m**, siendo únicamente el último comentado el que modificaréis. De esta forma, la plantilla que se comentará a

continuación puede ser utilizada para cualquier ejercicio en estado estacionario siendo, por tanto, una herramienta muy útil para vosotros.

Se parte de un módulo de membrana de ósmosis inversa con la finalidad de obtener agua con menor concentración de sal a partir de agua de mar. El módulo viene caracterizado por su índice de rechazo, R , y por su conversión, Y . El índice de rechazo y la conversión del módulo se definen de la siguiente forma:

$$R = \frac{C_a - C_p}{C_a} \quad Y = \frac{Q_p}{Q_a}$$

El sistema cuenta con una recirculación y purga, conociendo el coeficiente de bifurcación (α). Se toma como base de cálculo el caudal de entrada, Q_{ent} , cuya concentración es conocida, C_{ent} . Se quiere determinar el resto de las variables del sistema. Respecto a las unidades se puede considerar que Q está en m^3/s y C en kg/m^3 .

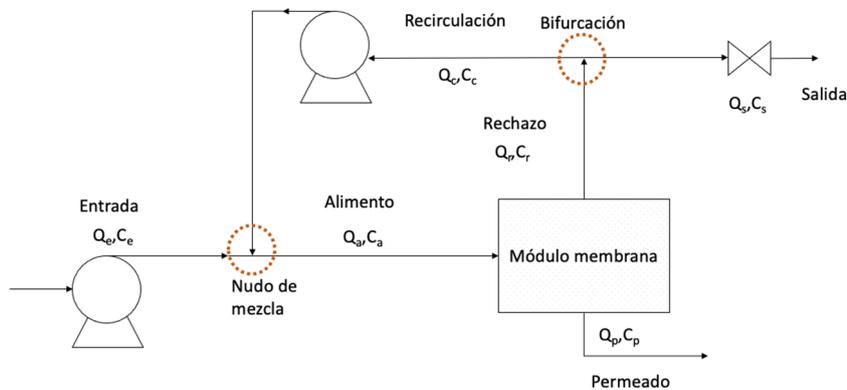


Figura 1. Esquema proceso ósmosis inversa

Dado que el artículo docente se centra en la resolución analítica, primero debéis realizar el planteamiento de los balances correspondientes del problema. Posteriormente, deberéis introducir dichas ecuaciones algebraicas en la plantilla para su resolución.

En el actual proceso, se debe plantear un balance de materia. Como primer paso, tenéis que conocer el lugar geométrico donde realizar los balances, por tanto **¿cuántos volúmenes de control (VC) hay presentes?**

En este caso hay presentes 3 VC (Figura 2), por lo que tendréis que aplicar los balances de materia en cada uno de ellos. Podéis encontrar más información de la resolución de balances de materia en el artículo previamente publicado [1].

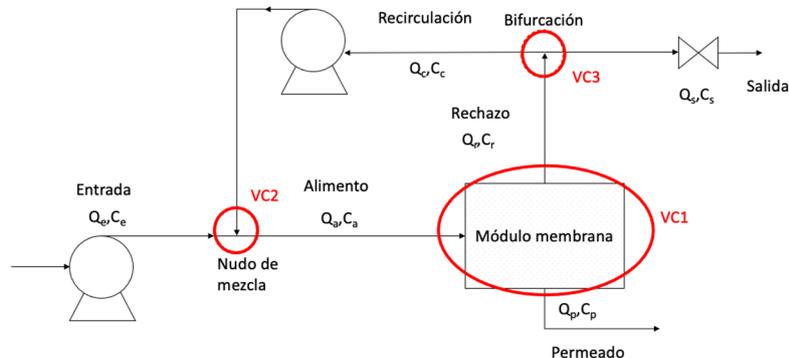


Figura 2. Volúmenes de control del proceso

En cada VC obtendréis un balance de materia total y también por componente utilizando, por tanto, flujos másicos totales y de sal de la siguiente forma:



$$\text{Total} \rightarrow Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \cdot \rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \dot{m}_{\text{total}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

$$\text{Sal} \rightarrow Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \cdot C \left(\frac{\text{kg sal}}{\text{m}^3} \right) = \dot{m}_{\text{sal}} \left(\frac{\text{kg sal}}{\text{s}} \right)$$

Como se ha mostrado, el flujo másico total depende de la densidad del fluido, mientras que el flujo másico de sal depende de la concentración. Al ser un proceso de filtración, se conoce que el objetivo principal es reducir la concentración de sal a la salida del módulo. A pesar de que las concentraciones cambien, debéis considerar como hipótesis que la densidad del fluido permanece constante. Por tanto, tomando las consideraciones comentadas, las ecuaciones en cada VC son las siguientes:

VC1

$$\text{Sal} \rightarrow Q_a \cdot C_a - Q_p \cdot C_p - Q_r \cdot C_r = 0$$

$$\text{Total} \rightarrow Q_a \cdot \rho_a - Q_p \cdot \rho_p - Q_r \cdot \rho_r = 0 \rightarrow \text{si } \rho_a \approx \rho_p \approx \rho_r \rightarrow Q_a - Q_p - Q_r = 0$$

El mismo procedimiento se realizará en los restantes VC.

VC2

$$\text{Sal} \rightarrow Q_e \cdot C_e + Q_c \cdot C_c - Q_a \cdot C_a = 0$$

$$\text{Total} \rightarrow Q_e + Q_c - Q_a = 0$$

VC3

$$\text{Sal} \rightarrow Q_r \cdot C_r - Q_s \cdot C_s - Q_c \cdot C_c = 0$$

$$\text{Total} \rightarrow Q_r - Q_s - Q_c = 0$$

¿Cuáles serían los siguientes pasos que debéis realizar?

Primero tenéis que conocer el número de variables y ecuaciones necesarias para tener especificado correctamente el problema con grados de libertad (GDL) igual a 0. Por tanto, debéis estudiar con más detalle toda la información proporcionada por el ejercicio:

- **Variables independientes:** se contabilizan las variables presenten en el problema, siendo en este caso los caudales y las concentraciones. La suma total es de **12 variables**.
- **Ecuaciones de balance de materia independiente:** se han obtenido **6 ecuaciones**, siendo dos para cada VC.
- **Variables independientes específicas:** el enunciado expone que el caudal y la concentración de entrada (Q_e y C_e) se conocen. Por tanto, se conocen **2 variables**.
- **Relaciones adicionales:** el enunciado expone las ecuaciones del índice de rechazo y conversión del módulo. Más allá del enunciado, se conoce que $C_c = C_s$ debido a que en una bifurcación hay variación de caudales, **pero nunca de concentración**. Por último, se conoce el coeficiente de bifurcación (α) el cual relaciona el caudal de salida de la membrana con el que se recircula al proceso.

$$Q_c = \alpha \cdot Q_r$$

Por tanto, se pueden obtener **4 relaciones adicionales**.

De esta forma, si realizáis el análisis de grados de libertad, obtendréis:



$$\text{GDL} = (\text{Var. Independientes}) - (\text{N}^\circ \text{ ecuaciones B.M}) - (\text{N}^\circ \text{ Var. Identificadas}) - (\text{N}^\circ \text{ relaciones adicionales}) = 12-6-2-4=0$$

Por tanto, mediante el análisis de GDL podéis concluir que el problema está especificado correctamente y, con ello, proceder a la resolución analítica mediante Matlab. Antes de cualquier resolución informática, debéis tener la certeza de que los GDL sean cero para resolver correctamente el problema. En el caso de que $\text{GDL} > 0$ significará que es necesario añadir más ecuaciones o fijar el valor de algunas variables para su resolución, en cambio si $\text{GDL} < 0$ significa que hay más ecuaciones o datos de los que son necesarios.

El siguiente paso es la introducción de datos en la plantilla de Matlab llamada "plantilla_BM.m". La plantilla de Matlab proporcionada está perfectamente estructurada de tal forma que podáis trasladar, de una forma sencilla e intuitiva, las ecuaciones algebraicas necesarias para la resolución del problema. Tal y como se muestra en la Figura 3, la "plantilla_BM.m" se estructura de la siguiente forma:

- Las variables especificadas (**specified variables**): son las variables que el problema nos especifica, ya sea con un valor numérico (resolución numérica) o simbólico como sería en este caso con la resolución analítica.
- Ecuaciones adicionales (**additional relations**): son aquellas que se pueden obtener mediante la información del enunciado y/u observando el esquema del proceso.
- Ecuaciones de balance de materia independientes (**independent material balance equations**): se refiere a las ecuaciones de balance en cada VC, tal y como se ha obtenido con anterioridad.
- Sumatorio de fracciones molares de cada corriente (**summation of the mole or mass fractions for each stream**): cuando existe más de un componente en una corriente, se debe cumplir que la suma de las fracciones molares o másicas debe ser igual a 1. En este caso, únicamente se tiene presencia del flujo de sal, por lo que no es necesario.

```
% Take into account all the independent material balance equations, the
% specified variables, the additional relations and the summation of the
% mole or mass fractions for each stream

% Write the equations following this example: eq{1}=F1==3

%% SPECIFIED VARIABLES
eq{1}=;
eq{2}=;

%% ADDITIONAL RELATIONS
eq{3}=;
eq{4}=;

%% INDEPENDENT MATERIAL BALANCE EQUATIONS
% VC1
eq{5}=;
eq{6}=;
% VC2
eq{7}=;
eq{8}=;

%% SUMMATION OF THE MOLE OR MASS FRACTIONS FOR EACH STREAM
eq{9}=;
eq{10}=;
```

Figura 3. plantilla_BM.m

Previamente a la introducción de datos, es recomendable siempre que asignéis un nombre intuitivo al archivo para que os permita conocer, de un simple vistazo, el problema al que se refiere. En este caso, el nombre del fichero ha sido "osmosis_inversa.m", aunque el nombre es arbitrario. A continuación, procedemos a

introducir las variables, relaciones adicionales y ecuaciones obtenidas con anterioridad. Pero siendo un lenguaje de programación **¿es difícil introducir las ecuaciones anteriormente planteadas?**

La forma de introducir la información es muy sencilla, ya que únicamente tendréis que introducir la etiqueta **eq{numeración}=** con su respectivo orden, tantas veces como información tengáis. El orden de las ecuaciones no afectaría en la resolución, aunque es muy aconsejable seguir la estructura de la propia plantilla. Además, debéis tener en cuenta que, a la hora de escribir las ecuaciones, el = se debe convertir en ==. Pero si el cálculo que vamos a realizar es analítico, **¿cómo podéis introducir las variables especificadas sin conocer su valor?**

Esto no supone ningún problema, ya que deberéis llamar a la variable especificada con otra variable genérica. Un ejemplo sería las variables específicas del problema, donde expone que se toma como base de cálculo el caudal y la concentración de entrada (Q_e y C_e). Dichas variables son las que se utilizan en los balances de materia, pero como son conocidas las llamaréis de la siguiente forma:

$$Q_e = Q_{ent}$$

$$C_e = C_{ent}$$

Siendo, por tanto, Q_{ent} y C_{ent} variables simbólicas pero consideradas variables conocidas. Así pues, teniendo en cuenta todas estas consideraciones, en la Figura 4 se observa el script **"osmosis_inversa.m"**.

```
% Take into account all the independent material balance equations, the
%specified variables, the additional relations and the summation of the
% mole or mass fractions for each stream

% Write the equations following this example: eq{1}=F1==3
% Write ; always at the end of the equations

%% Specified variables
eq{1}=Qe==Qent;
eq{2}=Ce==Cent;

%% Additional relations
eq{3}=R==(Ca-Cp)/Ca;
eq{4}=Y==Qp/Qa;
eq{5}=Qc==alfa*Qr;
eq{6}=Cs==Cc;

%% Independent material balance equations
% VC1
eq{7}=Qa-Qr-Qp==0;
eq{8}=Qa*Ca-Qr*Cr-Qp*Cp==0;
% VC2
eq{9}=Qe+Qc-Qa==0;
eq{10}=Qe*Ce+Qc*Cc-Qa*Ca==0;
% VC3
eq{11}=Qr-Qc-Qs==0;
eq{12}=Qr*Cr-Qc*Cc-Qs*Cs==0;

%% Summation of the mole or mass fractions for each stream
```

Figura 4. osmosis_inversa.m

El siguiente paso sería ejecutar el fichero steady_state_balances_solver.m, el cual permitirá, mediante la función de solve de la Symbolic Toolbox de Matlab, resolver de forma simbólica todas las ecuaciones algebraicas planteadas. Una vez ejecutado el programa os pedirá que indiquéis cuál será el fichero que queréis ejecutar. Deberéis introducir únicamente el nombre del fichero osmosis_inversa.m, **sin la extensión de Matlab**, en el command window, tal y como aparece a continuación:



Steady-state balance file name (without extension): osmosis_inversa

Una vez escrito el nombre del fichero, **pulsáis enter** y el programa os devolverá la siguiente información:

Please, verify that these are the variables of your problem

Columns 1 through 12

'Ca' 'Cc' 'Ce' 'Cent' 'Cp' 'Cr' 'Cs' 'Qa' 'Qc' 'Qe' 'Qent' 'Qp'

Columns 13 through 17

'Qr' 'Qs' 'R' 'Y' 'alfa'

Take into account that the number of variables (17) is bigger than the number of equations (12)

El fichero **steady_state_balances_solver.m** extrae de forma automática las variables que se han introducido en el fichero **osmosis_inversa.m**. Estas son mostradas en la pantalla, donde **realiza una comparación del número de variables introducidas con el número de ecuaciones**. En este caso se observa un mayor número de variables introducidas (17) que ecuaciones (12). Entonces, **¿es posible resolver el problema? ¿Por qué aparecen más variables que ecuaciones?**

Anteriormente comentamos que para que se pueda resolver es necesario que el valor de los GDL sea igual a cero. Matlab nos muestra este mensaje para que verifiquéis que los datos introducidos son correctos. Con esta información se podría decir que el problema no puede ser resuelto, ya que los GDL obtenidos serían de $17-12=5$ y, por tanto, es necesario conocer más información. **En cambio, nunca debéis perder de vista la finalidad del problema** la cual es la obtención de una resolución analítica, es decir, obtener ecuaciones simbólicas. Por tanto, es habitual en este tipo de resoluciones que aparezcan un mayor número de variables que ecuaciones, pero debéis ser conscientes de que esto tiene coherencia. Dado que no se tiene ningún dato numérico de variables conocidas, se debe introducir nuevas variables que hagan referencia a las conocidas. Por tanto, para conocer si es posible la resolución, debéis repasar las variables que son supuestamente conocidas y que son las variables que identifica Matlab como introducidas. Las conocidas son:

- **Variables especificadas por el sistema:** son las comentadas por el enunciado.

$$Q_e = Q_{ent} \quad C_e = C_{ent}$$

- **Relaciones adicionales:** el enunciado comenta que el módulo de la membrana viene caracterizado por el rechazo (R) y su conversión (Y), siendo estos valores supuestamente conocidos. Por otro lado, también nos indica que se conoce el coeficiente de bifurcación (α) el cual relaciona el caudal de rechazo de la membrana con el que se recircula al proceso. Entonces, hay 3 variables conocidas:

$$R = \frac{c_a - c_p}{c_a} \quad Y = \frac{Q_p}{Q_a} \quad Q_c = \alpha \cdot Q_r$$

Por tanto, podéis verificar que las 5 variables de más que Matlab nos ha notificado es debido a variables conocidas. De esta forma, se puede seguir con la resolución.

Seguido de la información proporcionada, el programa os pregunta qué tipo de resolución queréis realizar. Os indicará que si queréis obtener una solución numérica, donde se conocen datos numéricos, debéis introducir el valor 1. En otro artículo docente donde se evaluaban los balances de materia en una columna de destilación, se explicó

de forma detallada la metodología a seguir [2]. En cambio, si se desea una solución analítica, como es el objetivo del actual artículo, debéis introducir el valor 2.

Which type of solution do you prefer, numerical (1) or analytical (2)?:

Dado que **habéis elegido la solución analítica**, el programa os pedirá que escribáis el nombre de las variables que son conocidas en el problema. Dichas variables serían 5 y son las comentadas con anterioridad. Pero **¿cómo las introducimos en Matlab?**

El propio programa muestra un ejemplo para guiarnos en la forma de introducir las variables, siendo de la siguiente forma:

Write the cell corresponding to the known variables of your problem {'p1','p2',...}:

Por tanto, debéis introducir las variables conocidas tal y como se especifica en el programa, obteniendo lo siguiente:

```
{'Qent', 'Cent', 'R', 'Y', 'alfa'}
```

Una vez introducido, presionáis **Enter** y el programa devuelve las soluciones analíticas para que podáis analizarlas. El programa obtiene tanto la solución matemática como física, siendo en resoluciones analíticas las mismas ecuaciones. Ambas soluciones tienen mayor utilidad cuando de una resolución numérica se trata, donde la forma de expresar los valores difiere. Por tanto, en la figura 5 se muestra la solución obtenida por Matlab.

```
Mathematical Solutions:
[ Ca, -(Cent*(Y*alfa - alfa + 1))/(alfa - Y*alfa + R*Y*alfa - 1)]
[ Cc, (Cent*(R*Y - Y + 1)*(Y*alfa - alfa + 1))/((Y - 1)*(alfa - Y*alfa + R*Y*alfa - 1))]
[ Ce, Cent]
[ Cp, (Cent*(R - 1)*(Y*alfa - alfa + 1))/(alfa - Y*alfa + R*Y*alfa - 1)]
[ Cr, (Cent*(R*Y - Y + 1)*(Y*alfa - alfa + 1))/((Y - 1)*(alfa - Y*alfa + R*Y*alfa - 1))]
[ Cs, (Cent*(R*Y - Y + 1)*(Y*alfa - alfa + 1))/((Y - 1)*(alfa - Y*alfa + R*Y*alfa - 1))]
[ Q1, (Y*alfa - alfa + 1)/((Y - 1)*(alfa - 1))]
[ Qa, 1/((Y - 1)*(alfa - 1))]
[ Qc, -alfa/(alfa - 1)]
[ Qe, (Y*alfa - alfa + 1)/((Y - 1)*(alfa - 1))]
[ Qp, Y/((Y - 1)*(alfa - 1))]
[ Qr, -1/(alfa - 1)]
[ Qs, 1]

Physical Solution:
[Ca, -(Cent*(Y*alfa - alfa + 1))/(alfa - Y*alfa + R*Y*alfa - 1)]
[Cc, (Cent*(R*Y - Y + 1)*(Y*alfa - alfa + 1))/((Y - 1)*(alfa - Y*alfa + R*Y*alfa - 1))]
[Ce, Cent]
[Cp, (Cent*(R - 1)*(Y*alfa - alfa + 1))/(alfa - Y*alfa + R*Y*alfa - 1)]
[Cr, (Cent*(R*Y - Y + 1)*(Y*alfa - alfa + 1))/((Y - 1)*(alfa - Y*alfa + R*Y*alfa - 1))]
[Cs, (Cent*(R*Y - Y + 1)*(Y*alfa - alfa + 1))/((Y - 1)*(alfa - Y*alfa + R*Y*alfa - 1))]
[Q1, (Y*alfa - alfa + 1)/((Y - 1)*(alfa - 1))]
[Qa, 1/((Y - 1)*(alfa - 1))]
[Qc, -alfa/(alfa - 1)]
[Qe, (Y*alfa - alfa + 1)/((Y - 1)*(alfa - 1))]
[Qp, Y/((Y - 1)*(alfa - 1))]
[Qr, -1/(alfa - 1)]
[Qs, 1]
```

Figura 5. Solución analítica del problema osmosis_inversa.m

Una vez ejecutado todo el programa, se genera de forma automática un fichero llamado **physical_solution.txt**, el cual queda a vuestra disposición. En él aparece la solución analítica obtenida tras la resolución.

Finalmente, una vez resuelto el problema, podréis analizar las ecuaciones obtenidas y razonar qué relación presentan las variables desconocidas con los parámetros especificados. Esta última parte es la más interesante, ya que seréis capaces de



conocer qué influencia puede tener, por ejemplo, el índice de rechazo de la membrana sobre el caudal de salida de la membrana, entre otras relaciones disponibles.

5 Conclusiones

Habéis podido plantear un proceso de ósmosis inversa mediante la aplicación de balances de materia. Una vez obtenidas las ecuaciones y relaciones, habéis podido resolver de forma analítica el ejercicio propuesto de ósmosis inversa mediante Matlab. Haciendo uso de una plantilla estructurada, habéis introducido paso a paso las ecuaciones algebraicas necesarias. Además, se argumenta durante todo el artículo cómo podéis saber si el problema está o no perfectamente especificado para la obtención de una resolución analítica. Esto permite que tengáis mayor seguridad durante la resolución de un determinado problema. Una vez obtenidos los resultados analíticos, sois capaces de observar qué relación presentan las variables desconocidas con los parámetros especificados. Finalmente, os hemos mostrado la gran potencia de los métodos numéricos y cómo implementar ecuaciones algebraicas en herramientas informáticas como Matlab.

6 Bibliografía

- [1] Cardona Navarrete, S. C.; Fombuena Borràs, V.; Domínguez Candela, I. (2020). Ejemplo de resolución de un balance de materia en una columna de destilación.
- [2] Cardona Navarrete, S. C.; Fombuena Borràs, V. (2020). Cómo obtener con Matlab una solución numérica a un problema de balance de materia en régimen estacionario.