

**Análisis y compilación de información bibliográfica referente a los balances de materia,
con una sola, con varias unidades de proceso y sistemas con reacción química**

Basantes Romero, Diego Paúl

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Trabajo de Unidad de Integración Curricular, previo a la obtención del título de
Petroquímico

Ing. Luna Ortiz, Eduardo David

27 de agosto del 2021

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE PETROQUÍMICA**

Certificación

Certifico que el trabajo de unidad de integración curricular, “**Análisis y compilación de información bibliográfica referente a los balances de materia, con una sola, con varias unidades de proceso y sistemas con reacción química**” fue realizado por el señor **Basantes Romero, Diego Paúl** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 27 de agosto del 2021



Firmado electrónicamente por:
**EDUARDO
DAVID LUNA**

.....
Ing. Luna Ortiz, Eduardo David

C.C.: 1802724912

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE PETROQUÍMICA

Reporte Urkund



Document Information

Analyzed document	Basantes_Diego_Integración_Curricular.pdf (D111762897)
Submitted	8/27/2021 9:35:00 PM
Submitted by	Lorena Ibarra
Submitter email	loretaibarra@yahoo.es
Similarity	2%
Analysis address	lorenadibarra.uta@analysis.urkund.com



Sources included in the report

W	URL: https://doi.org/10.1201/b17696 Fetched: 8/27/2021 9:36:00 PM	 4
W	URL: http://www.tesoem.edu.mx/alumnos/cuadernillos/2009.006.pdf Fetched: 12/10/2020 11:56:13 PM	 2
W	URL: https://qdoc.tips/paginas-desdefelder-2-pdf-free.html Fetched: 5/17/2021 6:22:02 PM	 6
W	URL: https://blog.utp.edu.co/balances/files/2011/01/BMSINREACCI%C3%93N.pdf Fetched: 9/16/2020 3:32:00 PM	 1
W	URL: https://de.slideshare.net/adanfONSECAD/probleinario-de-balancedemateriayener Fetched: 1/16/2020 5:57:36 PM	 3
W	URL: https://link.springer.com/content/pdf/bbm%253A978-0-8176-8286-6%252F1.pdf Fetched: 8/27/2021 9:36:00 PM	 1
W	URL: https://qdoc.tips/principios-elementales-de-los-procesos-quimicos-jpr504-pdf-free.html Fetched: 5/17/2021 6:22:02 PM	 2
W	URL: https://pdfcookie.com/documents/tema-2-balance-de-materia-y-energia-68v404xj87lg Fetched: 6/24/2021 6:59:43 PM	 1
SA	BALANCE DE MATERIA PRO.docx Document BALANCE DE MATERIA PRO.docx (D23324963)	 1
W	URL: https://pdfcookie.com/documents/principios-elementales-de-los-procesos-quimicos-felder-52e1d009ydv8 Fetched: 5/18/2021 5:42:31 AM	 1
W	URL: https://dokumen.site/download/paginas-desdefelder-a5b39f0b41d559 Fetched: 12/8/2020 8:07:14 AM	 2
W	URL: https://de.slideshare.net/pattyduck044/balance-materia Fetched: 1/30/2021 8:33:35 AM	 1

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE PETROQUÍMICA

Responsabilidad de autoría

Yo, **Basantes Romero, Diego Paúl**, con cédula de ciudadanía N.º 0504309659, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de unidad de integración curricular: **Análisis y compilación de información bibliográfica referente a los balances de materia, con una sola, con varias unidades de proceso y sistemas con reacción química** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 27 de agosto del 2021



.....
Basantes Romero, Diego Paúl

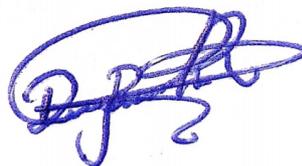
C.C.: 0504309659

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE PETROQUÍMICA

Autorización de publicación

Yo **Basantés Romero, Diego Paúl**, con cédula de ciudadanía N.º 0504309659, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de unidad de integración curricular: **Análisis y compilación de información bibliográfica referente a los balances de materia, con una sola, con varias unidades de proceso y sistemas con reacción química** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 27 de agosto del 2021



.....
Basantés Romero, Diego Paúl

C.C.:0504309659

Dedicatoria

Es trabajo dedico a:

A mi mamá, papá y hermano por darme todo el apoyo posible en todo lo que he necesitado, por ayudarme a superar todos los obstáculos que se han presentado en esta etapa de mi vida.

A mis abuelitos por estar siempre pendientes de mí, y ser una guía para tomar las decisiones correctas en todos los ámbitos.

A mi enamorada (Betzy) por creer en mí y enseñarme que en las metas también hay tiempo para el amor.

Agradecimientos

En los años de aprendizaje en la universidad se recibe ayuda de varias personas, por tal razón se agradece el apoyo por mínimo que haya sido. En especial quiero agradecer a mi mamá, papá y hermano por darme todo el apoyo que se puede desear tanto económico, como emocional.

No tenemos que olvidarnos de agradecer a esos excelentes docentes que nos impartieron su conocimiento a lo largo de la universidad, y que alguna vez incluso nos dieron ánimos para seguir en el camino correcto hacia nuestra meta.

Al Ing. David Luna por ser un excelente profesor, y que con sus conocimientos y experiencia brindó una gran ayuda para el desarrollo del trabajo.

Quiero agradecer a mis amigos Betzy, Jorge, Vane, Lili, Brayan, Johan, Andrés, Henry, por formar parte de mi vida y estar presentes en momentos importantes como este.

Tabla de contenidos

Carátula	1
Certificación	2
Reporte Urkund	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimientos	7
Resumen	9
Abstract	10
Generalidades	11
Antecedentes	11
Planteamiento del Problema	11
Justificación e importancia	12
Objetivo	12
<i>Objetivo General</i>	12
<i>Objetivos específicos</i>	12
Capítulo II	13
Conclusiones y recomendaciones	14
Conclusiones	14
Recomendaciones	15
Bibliografía	16
Anexos	18
Anexo 1	18

Resumen

Los balances de materia son una parte fundamental en el análisis de procesos químicos y petroquímicos, por tal razón, en un primer capítulo se desarrolla la ecuación de balance de materia en una unidad de proceso, donde se definen los tipos de regímenes, tales como estado estacionario y estado transitorio o no estacionario, se explica la especificación de corrientes en los diagramas flujos y el uso de una base de cálculo para la resolución de problemas. En el segundo capítulo se comprende el balance de materia en varias de unidades de procesos, se detallan las características de los sistemas que abarquen varias unidades de procesos considerando sistemas y subsistemas con el fin de simplificar el análisis de los balances de materia, los grados de libertad y la existencia de corrientes particulares en este tipo de procesos. En el tercer capítulo se analiza un proceso reactivo, siendo este el más común en la industria química y petroquímica. En estos procesos es necesario conocer algunos términos relacionados con las reacciones químicas, tales como estequiometría, conversión, rendimiento, selectividad, entre otros. Se definen los balances de materia por especies atómicas, especies moleculares, y avance de reacción, además, se explican características de reacciones de combustión.

Palabras clave:

- **Balance de materia**
- **Diagrama de flujo**
- **Corrientes**
- **Reacción química**

Abstract

The material balances are a fundamental part in the analysis of chemical and petrochemical processes, for this reason, in the first chapter the material balance equation in a process unit is developed, where the types of regimes are defined, such as steady state and transient or non-steady state, the specification of streams in the flow diagrams is explained and the use of a calculation base for the resolution of problems is explained. In the second chapter the material balance in several process units is understood, the characteristics of the systems that include several process units are detailed, considering systems and subsystems in order to simplify the analysis of the material balances, the degrees of freedom and the existence of particular streams in this type of processes. In the third chapter a reactive process is analyzed, being this the most common in the chemical and petrochemical industry. In these processes it is necessary to know some terms related to chemical reactions, such as stoichiometry, conversion, yield, selectivity, among others. The balances of matter are defined by atomic species, molecular species, and reaction progress, in addition, characteristics of combustion reactions are explained.

Keywords:

- **Material balance**
- **Flowchart**
- **Streams**
- **Chemical reaction**

Capítulo I

1. Generalidades

1.1 Antecedentes

El estudio de balance de materia es una introducción fundamental al análisis de procesos, relacionando variables conocidas y desconocidas para obtener información necesaria, y determinar las incógnitas mediante la utilización de ley de conservación de la materia (Felder & Rousseau, 2004).

Para el cálculo de balance de materia en unidades de proceso es necesario conocer sobre las especies generadas y consumidas en una reacción química, la esquematización de los diagramas de flujo de un sistema y las variables que se encuentran en el proceso (Murphy, 2007).

Según Felder & Rousseau, (2004) el balance de materia se utiliza para diseñar o analizar completamente un proceso, es decir, cuando las cantidades en las corrientes de entrada y salida de cada unidad de proceso satisfacen las ecuaciones de balance de materia.

En procesos químicos, petroquímicos o afines se busca tener costos de producción bajos, el balance de materia es utilizado como una forma de cuantificar los componentes de un proceso. Según Barros et al., (2017) en la industria de la refinación es requerido tener un rendimiento alto en productos de calidad con un costo de producción lo más bajo posible. El balance de masa de las especies presentes en el proceso cuantifica la generación y consumo, identificando diferentes maneras de optimizar el proceso.

1.2 Planteamiento del Problema

Los balances de materia con y sin reacción química son una parte fundamental en la introducción a los procesos de ingeniería química y petroquímica. Sin embargo, la información bibliográfica en su mayoría detalla el balance de materia en suposiciones o en conocimiento más avanzado como el de operaciones unitarias.

La falta de conocimiento en las ecuaciones de balance de materia provoca que, al resolver un problema de un proceso industrial en ingeniería química y petroquímica,

no se puedan obtener las condiciones de operación a tomar en cuenta, y no se logre resolver el problema presentado.

1.3 Justificación e importancia

La generación y compilación de material bibliográfico referente a los balances de materia en procesos de ingeniería química aplicada a la petroquímica, implica llevar a cabo un análisis sobre los balances de materia en procesos con una sola etapa y varias unidades de proceso, también en procesos que incluyan reacciones químicas. En los balances de materia de procesos de una sola etapa se analiza el sistema de forma general. Estos sistemas se analizan por su modo de funcionamiento, es decir, en estado estacionario o transitorio, y en sistemas cerrados o abiertos. En el análisis de balances de materia en procesos de varias unidades se toma en cuenta conceptos como los grados de libertad. Un método de análisis será identificar subsistemas en un proceso de varias unidades, lo que permitirá obtener ecuaciones de balance de materia simples. En los balances de materia que incluyen reacciones químicas, se analizarán los cambios en las ecuaciones de balance de materia al incluir un reactor químico en un proceso. Estos cambios dependerán de los flujos molares de las especies que participan en la reacción química. El objetivo de analizar la información sobre los balances de materia en procesos con una sola y varias unidades de proceso; y sistemas con reacción química, es el de utilizar esta información para elaborar un capítulo que describa los métodos de resolución de balances de materia, y publicar como una alternativa de aprendizaje para estudiantes de ingeniería química, petroquímica o a fines.

1.4 Objetivo

1.4.1 Objetivo General

Analizar y compilar información bibliográfica referente a los balances de materia, con una sola, con varias unidades de proceso y sistemas con reacción química.

1.4.2 Objetivos específicos

- Recopilar información bibliográfica conceptual sobre los balances de materia considerando una sola unidad de proceso.
- Compilar información bibliográfica conceptual sobre los balances de materia con varias unidades de proceso.
- Analizar e identificar los procesos con reacción química para establecer ecuaciones de balance de masa.

- Elaborar material bibliográfico referente a los balances de materia con procesos de una y varias unidades; y procesos con reacción química con la información compilada en los objetivos descritos anteriormente.

Capítulo II

El producto acreditable a presentar es el material bibliográfico en relación a la información compilada sobre balance de materia, con una sola, con varias unidades de proceso y sistemas con reacción química, para ser utilizado en la elaboración de capítulos de un libro de balance de materia y energía y se encuentra detallado en el anexo 1

Capítulo III

3. Conclusiones y recomendaciones

3.1 Conclusiones

- Basado en el análisis de información bibliográfica de balances de materia para sistemas de una sola unidad de proceso, se pudo establecer un compendio de definiciones importantes referentes a métodos de resolución de balance de materia aplicados a la ingeniería química y petroquímica.
- Mediante la investigación bibliográfica realizada para el presente trabajo, se puede concluir que algunos de los términos presentes en la ecuación de balance de materia dependerán del tipo y el régimen en que se encuentre el proceso, es decir, para procesos continuos en régimen estacionario el término de acumulación será cero; para procesos que no incluyan reacciones químicas, los términos de generación y consumo no se tomarán en cuenta en la ecuación de balance de materia.
- La información recopilada acerca de los balances de materia en varias unidades de proceso permite concluir que el detalle y la aplicación de las corrientes características de estos sistemas, acercarán a los estudiantes a la realidad de los procesos químicos y petroquímica en la industria.
- En la recopilación bibliográfica de balances de materia para varias unidades de proceso, se observó que existe poca información referente a los balances de materia aplicados a problemas de procesos de la industria petroquímica; en la bibliografía generalmente se encuentran problemas de balances de materia referentes a la ingeniería química.
- La revisión bibliográfica permitió establecer el orden correcto para detallar los sistemas reactivos, comenzando con conceptos relacionados con las reacciones químicas como la conversión fraccionaria, reactivo limitante, reactivo en exceso, selectividad, rendimiento; los cuales son combinados con la ecuación de balance de materia, haciendo posible comprender los enfoques de avance de reacción, especies moleculares y especies atómicas, para utilizarlos en la resolución de problemas de balance de materia en presencia de reactores químicos.
- La elaboración del presente trabajo de compilación y análisis bibliográfico de balances de materia permite concluir que, los conceptos definidos con detalle y su aplicación a problemas de procesos en la industria petroquímica y química,

presentarán una alternativa de aprendizaje a los lectores que deseen estudiar los balances de materia en el ámbito de ingeniería química, petroquímica o afines.

3.2 Recomendaciones

- Los procesos relacionados con la química verde y biorrefinería van en aumento, por tal razón, se recomienda aumentar la recopilación de información bibliográfica de balances de materia aplicados a biomasa y química verde.
- Se recomienda la utilización programas computacionales o simuladores de procesos químicos y petroquímicos para la resolución de problemas, y de esta manera corroborar los resultados obtenidos al aplicar las ecuaciones de balance de materia.
- La ciencia avanza constantemente, por tal razón, es recomendable actualizar este compendio cada cierto tiempo, para poder aplicar en nuevas tecnologías en el ámbito de ingeniería química, petroquímicas y a fines.
- En relación a los procesos reactivos, se recomienda complementar con información bibliográfica acerca de cinética química, debido a que los resultados obtenidos en un reactor químico dependerán de las condiciones dadas en el proceso.

Bibliografía

- Ashrafizadeh, S. A., & Tan, Z. (2018). *Mass and Energy Balances*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72290-0>
- Barros, A., Guerra, L. T., Simões, M., Santos, E., Fonseca, D., Silva, J., Costa, L., & Navalho, J. (2017). Mass balance analysis of carbon and nitrogen in industrial scale mixotrophic microalgae cultures. *Algal Research*, 21, 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.10.014>
- Delgado-Linares, J. G., Delgado-Linares, G. A., & Mercado-Ojeda, R. A. (2009). Balances de masa y energía simplificados, aplicados a un proceso de craqueo catalítico de petróleo. *Educación Química*, 20(4), 456–460. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30050-8](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30050-8)
- Felder, R., & Rousseau, R. (2004). *Principios elementales de los procesos químicos*. Limusa Wiley.
- GARAVITO, N. G. (2009). *Balance De Materia*.
- Ghasem, N., & Henda, R. (2014). *Principles of Chemical Engineering Processes: Material and Energy Balances* (Second). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17696>
- Himmelblau, D. M. (1997). *Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química*. Prentice-Hall.
- Izquierdo, J., Costa, J., Martínez de la Ossa, E., Rodríguez, J., & Izquierdo, M. (2011). *Introducción a la Ingeniería Química: Problemas resueltos de balances de materia y energía*. Editorial Reverté.
- Matar, S., & Hatch, L. F. (1994). *Chemistry of Petrochemical Processes*. Gulf Publishing.
- Morris, A. E., Geiger, G., & Fine, H. A. (2011). *Handbook on Material and Energy Balance Calculations in Materials Processing*. Wiley.
- Murphy, R. M. (2007). *Introducción a los Procesos Químicos: Principios, análisis y síntesis*. McGraw-Hill Interamericana.
- Reklaitis, G. V., & Schneider, D. R. (1986). *Balances de materia y energía*. Interamericana.

Vázquez, R. M., Miranda Pascual, G., Romero Sánchez, M. del R., & Muñoz Pérez, G. (2014). *Balance de materia y energía: Procesos industriales*. Patria.

Veverka, V. V., & Madron, F. (1997). *Material and Energy Balancing in the Process Industries*. Elsevier.

WARN, A., & BREW, J. (1980). Mass balance. *Water Research*, 14(10), 1427–1434.
[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90007-X)

Anexos

Anexo 1

Análisis y compilación de información
bibliográfica referente a los balances de
materia, con una sola, con varias
unidades de proceso y sistemas con
reacción química

Contenido

Simbología	iv
1. Balances de Materia por Unidad de Proceso	1
Objetivos de Aprendizaje	1
1.1 Balance de Materia.....	2
1.2 Tipos de Régimen en los Balances de Materia.....	4
1.3 Tipos de Balance de Materia.....	4
1.3.1 Balance Diferencial.....	5
1.3.2 Balance Integral	5
1.4 Balance de Materia en Estado Estacionario	5
1.4.1 Especificación de Corrientes en un Diagrama de Flujo.....	6
1.5 Base de Cálculo	8
1.6 Método General para la Resolución de Problemas de Balance de Materia con una Unidad de Proceso.....	10
Ejercicios propuestos	39
Referencias	43
2. Balance de materia para múltiples unidades de proceso	44
Objetivos de aprendizaje	44
2.1 Proceso de múltiples unidades.....	45
2.2 Análisis de grados de libertad.....	46
2.3 Recirculación, baipás, purga y realimentación.....	49
2.3.1 Recirculación	50
2.3.2 Baipás.....	50
2.3.3 Purga.....	51
2.3.4 Corriente de realimentación.....	52
Ejercicios Propuestos.....	79
Referencias	83
3. Balance de Materia Con Reacción Química.....	85

Objetivos de Aprendizaje	85
3.1 Estequiometría.....	86
3.1.1 Ecuación Estequiométrica.....	86
3.1.2 Reactivo Limitante y en Exceso	86
3.1.3 Conversión fraccionaria	89
3.2 Balances de Materia con Reacción Química	90
3.2.1 Balance de Materia General	90
3.2.1.1 Ecuación Diferencial de Balance de Materia.....	92
3.2.1.2 Ecuación Integral de Balance de Materia	95
3.3 Avance de Reacción con una Reacción Química.....	95
3.4 Método de Balance de Materia Atómico.....	97
3.5 Método de Balance de Materia por Componentes Moleculares.....	98
3.6 Reacciones Múltiples por el Método de Avance de Reacción.....	110
3.6.1 Rendimiento	111
3.6.2 Selectividad	111
3.6.3 Avance de reacción para sistemas con múltiples reacciones.....	111
3.7 Balance por Especies Moleculares en Múltiples Reacciones	115
3.8 Análisis de Grados de Libertad en Sistemas con Reacción Química	123
3.9 Equilibrio Químico	124
3.10 Reacciones de Combustión.....	126
3.10.1 Aire teórico requerido y aire en exceso	127
Ejercicios Propuestos.....	130
Referencias	133

Simbología

La simbología utilizada para las variables que representan una unidad de dimensión, se encuentra a continuación.

a, b, c, d, e	Constantes utilizadas para expresar los coeficientes de una reacción química o cualquier variable extra de un problema en la resolución de ecuaciones.
m, \dot{m}	(m) es la cantidad en peso y (\dot{m}) es flujo másico.
n, \dot{n}	(n) es cantidad en moles y (\dot{n}) es flujo molar
GDL	Grados de libertad, abreviatura en castellano. En la bibliografía en mayor parte se encontrará como DOF.
V, \dot{V}	(V) es el volumen de una unidad o de un fluido y (\dot{V}) es flujo volumétrico.
x, y	Estas letras se utilizan para fracciones másicas o molares, y para representar el estado de la corriente de un proceso sea líquida (x) o gaseosa (y).
Δ	Es el cambio de una variable en el proceso
γ_i	Coefficiente estequiométrico de una especie i en una reacción química
ξ	Avance de reacción. Tomando un flujo molar inicial y final el avance de reacción se expresa como $\xi = \frac{\dot{n}_{i0} - \dot{n}_i}{\gamma_i}$, en una reacción química solo existe un valor de avance de reacción.
ρ	Densidad
f	Conversión fraccionaria
PM	Peso molecular

1

Balances de Materia por Unidad de Proceso

Los balances de materia son esenciales en los procesos químicos y petroquímicos, porque se utilizan como parte del análisis y diseño de unidades de proceso con el fin de calcular caudales másicos o molares de las corrientes de entrada o salida. En el presente capítulo se analizarán los aspectos relacionados con el balance de materia en un sistema general que permitirá comprender su uso en procesos químicos específicos. Además, se identificarán los sistemas de acuerdo a su modo de funcionamiento siendo estacionario o no estacionario, abierto o cerrado, enfocándose en cómo resolver balances de materia en estado estacionario con una sola unidad de proceso.

Objetivos de Aprendizaje

- Comprender la definición de balance de materia.
- Analizar los diferentes sistemas y sus implicaciones en los balances de materia.
- Desarrollar balances de materia para procesos con una sola unidad, considerando una base de cálculo adecuada.

1.1 Balance de Materia

Los balances de materia son la aplicación de la ley de la conservación de la masa enunciada por el químico francés Antoine-Laurent de Lavoisier en 1785, que establece que la masa no se puede crear ni destruir, para un sistema dado este balance de materia puede darse para una masa o moles totales, masa o moles de un compuesto químico, o, masa o moles de una especie química; por ejemplo, se ingresan 50 libras de propano y 50 libras de butano en un mezclador, se espera obtener 100 libras de esta mezcla en la salida del mezclador. Expresando esta ley en términos generales, para una masa total del sistema se tendría,

$$\text{masa total de entrada} = \text{masa total de salida} \quad (1.1)$$

Esta ecuación interpreta la conservación de la materia en un sistema, indicando una forma simple de balance de materia, donde no hay acumulación, consumo y generación. Para aplicar un balance de materia, se debe definir al sistema, pudiendo ser una o varias unidades de proceso. Un sistema es una porción definida del universo con límites reales o imaginarios, para una o varias unidades de proceso, bajo esta definición se debe considerar la superficie que contiene a esta porción del universo denominada volumen de control. En la salida y entrada del sistema existe un límite, denominado frontera del sistema, y en el volumen de control pueden ocurrir cambios químicos y físicos.

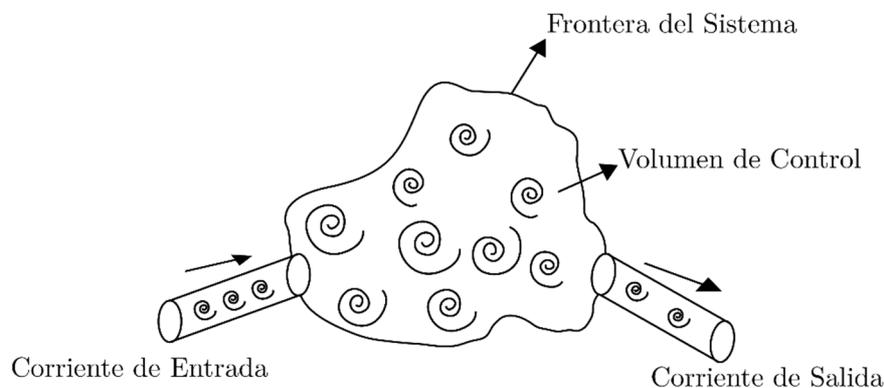


FIGURA 1.1

Sistema para un balance de materia

En la figura 1.1, se observa una representación de un sistema para un balance de materia, con sus respectivas corrientes de entrada y salida, además de una frontera que define el volumen de control donde pueden ocurrir cambios físicos y químicos o se puede dar la acumulación de materia, aportando nuevos términos en la ecuación 1.1 quedando la siguiente manera.

$$\text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo} = \text{Acumulación} \quad (1.2)$$

donde

acumulación: es el cambio de la materia en el sistema.

entrada: es la materia que ingresa al sistema cruzando la frontera.

salida: es la materia que sale del sistema cruzando la frontera.

generación: es la materia generada dentro del sistema por medio de una reacción química.

consumo: es la materia consumida dentro del sistema por medio de una reacción química.

Se debe considerar una ecuación de balance de materia para cada componente que exista en las corrientes y el sistema. Por lo tanto, si hay un número n de componentes en el sistema y en las corrientes, entonces existirá un número n de ecuaciones de balance de materia para cada componente.

Debido a que los componentes no pueden generarse ni consumirse sin reacción química, a excepción de reacciones nucleares, los términos de generación y consumo se relacionan por medio de los coeficientes estequiométricos de los compuestos presentes en la reacción. Por ejemplo:



donde (a, b, c) son los coeficientes estequiométricos de los reactivos A, B y productos químicos C.

Las relaciones estequiométricas son:

$$\frac{\text{moles de A consumidas}}{\text{moles de B consumidas}} = \frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{a}{b}$$

$$\frac{\text{moles de C generadas}}{\text{moles de B consumidas}} = \frac{-\gamma_C}{\gamma_b} = \frac{c}{b}$$

Los balances de materia para los componentes A, B, C, se relacionarán entre sí por medio de esas relaciones estequiométricas.

Los coeficientes estequiométricos son los valores que se encuentran antes de cada reactivo y producto en una reacción estequiométrica balanceada. Un valor positivo o negativo en un coeficiente estequiométrico representará un producto o reactivo respectivamente. Es importante diferenciar el valor de un coeficiente estequiométrico de un reactivo o producto de las moles de cada componente presente en la reacción química, el coeficiente estequiométrico es el número de moléculas o átomos presentes en la reacción química, y las moles es la cantidad de una sustancia.

1.2 Tipos de Régimen en los Balances de Materia

Existen dos tipos, régimen en estado estacionario y régimen en estado transitorio o no estacionario, en un proceso en estado estacionario las variables no cambian con el tiempo, en cambio, en estado no estacionario las variables cambian con el tiempo. Por otro lado, los procesos químicos se pueden clasificar en continuos, por lotes y semicontinuos. En procesos continuos los flujos de entrada y salida fluyen todo el tiempo por todo el sistema, mientras que en los procesos por lotes los productos son retirados en momentos deseados, y en un proceso semicontinuo se da la combinación de los dos procesos mencionados anteriormente.

1.3 Tipos de Balance de Materia

Existen dos formas de analizar los balances de materia:

1.3.1 Balance Diferencial

Representa los procesos continuos en el tiempo, es decir, señala lo que ocurre en el sistema en un momento determinado.

1.3.2 Balance Integral

Es una forma de escribir el balance de materia en intervalos de tiempo, generalmente este balance se utiliza en procesos por lotes.

El presente compendio se enfocará en los balances de materia diferenciales en estado estacionario, y balances de materia integrales aplicados a sistemas por lotes, el análisis matemático de los balances integral y diferencial será considerado posteriormente.

1.4 Balance de Materia en Estado Estacionario

Los diagramas de flujo organizan la información de los procesos para resolver los balances de materia, para resolver problemas se deben interpretar todos los datos del diagrama para la resolución de ejercicios.

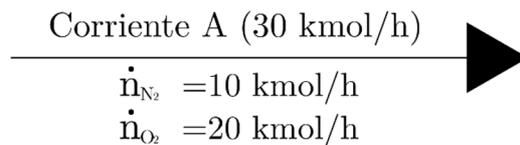
Para realizar los balances de materia se escriben los valores de todas las corrientes conocidas de entrada y salida en el diagrama, y a los valores desconocidos se puede asignar un símbolo algebraico.

Cuando se trata de procesos de una sola unidad sin reacción química se asume que no existe generación ni consumo, en procesos continuos en estado estacionario la acumulación es igual a cero. Toda corriente que esté totalmente especificada debe tener caudal y composición de cada especie conocida, las composiciones fraccionales de cada componente en las corrientes de los diagramas, se pueden representar con letras w , x , y , z (en letras minúsculas).

1.4.1 Especificación de Corrientes en un Diagrama de Flujo

Una corriente del diagrama está totalmente especificada cuando están expresados los caudales másicos de cada especie involucrada en el proceso. En el siguiente ejemplo se representa una corriente completamente especificada.

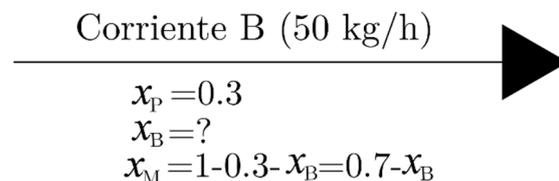
Una corriente A contiene 10 kmol/h de N_2 y 20 kmol/h de O_2 . La suma de los dos caudales molares representará el flujo total de la corriente A. El flujo molar total será $A=30$ kmol/h.



Ahora se tendrá una corriente B con un flujo másico total de 50 kg/h de una mezcla que contiene propano (P), butano (B) y metano (M). La corriente contiene 30% de propano en masa. En este caso, se tiene una corriente especificada parcialmente en forma de composiciones fraccionales. Para especificar una composición fraccional, se utiliza:

$$\dot{m}_i = \dot{m}_{\text{total}}(x_i) \quad (1.3)$$

donde (\dot{m}_i) es el flujo másico de un componente i y (x_i) es la composición fraccional del componente i en la corriente.



Cuando se tiene una corriente especificada parcialmente con fracciones molares, las fracciones parciales de los componentes no especificados se calculan en términos de uno de los componentes de las corrientes, evitando el exceso de variables desconocidas.

Ejemplo 1.1 Especificación de Corrientes y Balance de Materia de una Destiladora

En un destilador ingresa una mezcla de tres componentes A, B y C, de diferente composición, separándose en el destilado los compuestos A, B y C, y en el fondo de la columna únicamente los compuestos A y B. Exprese las ecuaciones de balance de masa.

Solución

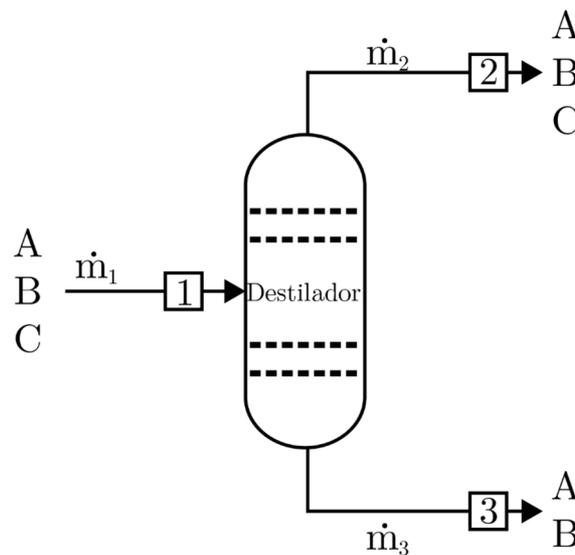


FIGURA DEL EJEMPLO 1.1.1

Esquema de una columna de destilación

Consideraciones:

No hay reacción química (generación y consumo=0).

No hay especificación de acumulación, se asume como proceso en régimen estacionario (acumulación=0).

Balance general de materia:

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$$

donde $(\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3)$ son los caudales másicos de entrada y salida, respectivamente.

En las corrientes y el sistema existen 3 componentes, entonces se tienen ecuaciones independientes para cada componente.

Balance por componentes:

$$\text{A: } \dot{m}_{1A} = \dot{m}_{2A} + \dot{m}_{3A}$$

$$\text{B: } \dot{m}_{1B} = \dot{m}_{2B} + \dot{m}_{3B}$$

$$\text{C: } \dot{m}_{1C} = \dot{m}_{3C}$$

1.5 Base de Cálculo

Una base de cálculo es una cantidad de masa, moles o flujos de una corriente, que define la escala de un proceso. Una de las corrientes que entra o sale del proceso, comúnmente es utilizada como base de cálculo. Pero, esta no es una regla, puesto que, cualquier corriente dentro del sistema se puede utilizar como base de cálculo. Cuando se quiere cambiar los valores de las cantidades o velocidades de flujo de las corrientes sin variar las composiciones fraccionales, es necesario un ajuste de escala. Se puede aumentar o disminuir la escala, sin afectar las composiciones.

Para elegir una base de cálculo se recomienda lo siguiente:

- Se puede elegir un dato de caudal de corriente de entrada o salida, proporcionado en el enunciado del problema.
- En el caso que no se proporcionen caudales de corriente, se puede elegir como base de cálculo una corriente que tenga composiciones fraccionales conocidas.
- Si se conocen las fracciones másicas de cada componente en una corriente, se recomienda elegir la cantidad total de masa o el caudal molar másico de la corriente.

-Cuando se conocen las fracciones molares de los componentes de una corriente, se recomienda elegir la cantidad total de moles o el caudal molar total de la corriente.

Ejemplo 1.2 Ajuste a Mayor Escala

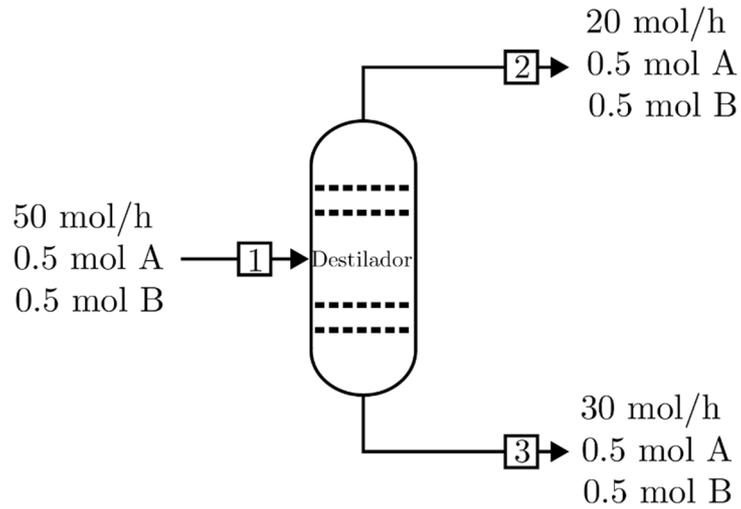


FIGURA DEL EJEMPLO 1.2.1

Escala normal

Solución

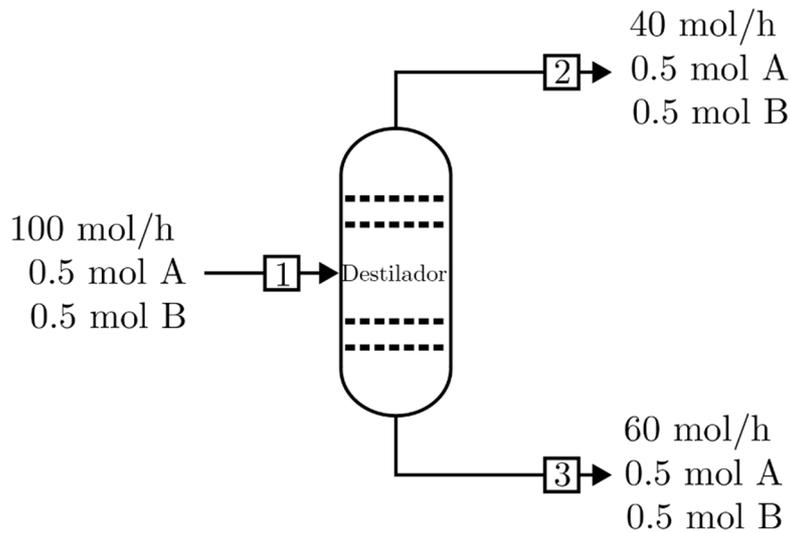


FIGURA DEL EJEMPLO 1.2.2

Escala aumentada

Se observa que la escala del proceso se aumenta al doble sin afectar las composiciones de las corrientes. También se puede aplicar un factor de

escala para expresar un mismo proceso en diferentes unidades de medida. Por ejemplo, se requiere obtener las mismas composiciones en la separación del anterior diagrama de flujo para una alimentación de 500 lbmol/h.

$$\frac{500 \frac{\text{lbmol}}{\text{h}}}{100 \frac{\text{mol}}{\text{h}}} = 5 \frac{\text{lbmol}}{\text{mol}} \rightarrow \text{Factor}$$

Se multiplica los flujos molares por el factor para convertir:

En la corriente 2:

$$40 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \times 5 \frac{\text{lbmol}}{\text{mol}} = 200 \frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$$

En la corriente 3:

$$60 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \times 5 \frac{\text{lbmol}}{\text{mol}} = 300 \frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$$

En el nuevo diagrama de flujo se tiene:

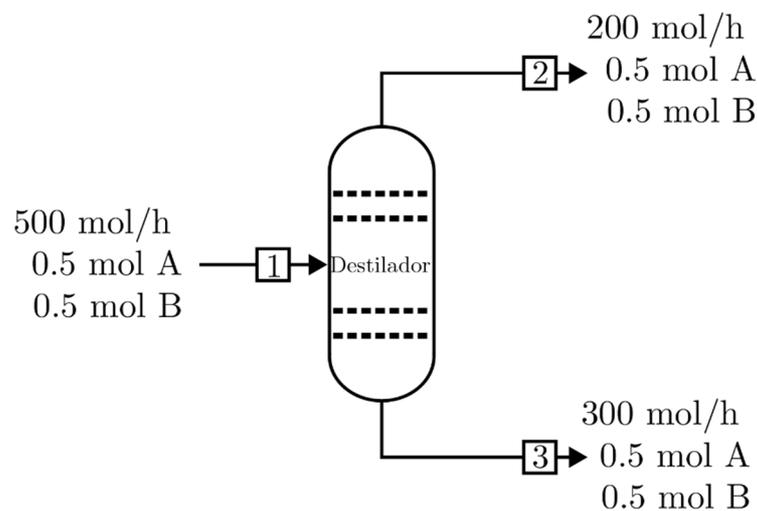


FIGURA DEL EJEMPLO 1.2.3

Escala sin variar las composiciones

1.6 Método General para la Resolución de Problemas de Balance de Materia con una Unidad de Proceso

Muchas veces la interpretación de un ejercicio de balance de materia suele tornarse complicado al iniciar su estudio, sin embargo, llevar un orden puede

evitar confusiones y facilitar la resolución del mismo, debido a que todos los balances de materia son variaciones de un mismo tema con cambios en las especificaciones de las corrientes.

Para la resolución de problemas de balance de materia con una unidad de proceso, se presenta una serie de pasos que facilitarán su desarrollo.

1. Dibujar el diagrama de flujo que represente el proceso.

Siempre es necesario realizar un diagrama del proceso porque facilita la comprensión del problema.

Cada unidad de proceso se representa con un bloque (figura geométrica) y se indica que tipo de unidad es (separador, reactor, mezclador, etc.), conectados entre sí por flechas que representan a las corrientes.

Enumerar todas las corrientes y detallar las composiciones de cada una.

2. Definir el sistema.

El sistema puede estar compuesto por una o varias unidades de proceso.

Si el sistema es estacionario la acumulación es igual a cero.

En el caso de que el sistema sea un divisor, se considera que todas las corrientes de salida tendrán la misma composición, a diferencia del separador en donde las corrientes de salida son de distintas composiciones.

3. Elegir los componentes y definir las variables de corriente.

Cuando exista una reacción química con estequiometría conocida, considerar a los compuestos como componentes, caso contrario considerar a los elementos como componentes.

Cuando se trabaje con compuestos químicos se considerarán componentes si no cambian su composición.

El número de variables en una corriente será igual al número de componentes de la misma corriente.

Los elementos no se consumen o generan, sólo los compuestos.

4. Conversión de unidades.

Convertir todas las variables a un mismo sistema de unidades.

Cuando exista una reacción se debe trabajar con moles, si no hay una reacción se puede usar moles o masa.

5. Definir una base de cálculo.

Una base de cálculo puede ser considerada en la corriente de entrada o salida del sistema, si el ejercicio no proporciona una base de cálculo es necesario asumir un valor arbitrario. De preferencia números enteros 10, 100, 1000.

Si el ejercicio especifica una sola corriente se debe tomar la cantidad o flujo total como base de cálculo, y si el ejercicio presenta dos o más corrientes se deben sumar todas las cantidades o flujos y trabajar con el total como base de cálculo.

Si el ejercicio proporciona una base de cálculo que complique la resolución del problema, se permite cambiar la base de cálculo, determinar las composiciones, para luego retomar la base inicial y obtener los valores reales.

6. Realizar el análisis de grados de libertad.

Identificar y enumerar las incógnitas que presenta el problema.

Identificar las ecuaciones que relacionan a las incógnitas.

Si el ejercicio presenta un igual número de incógnitas en relación con las ecuaciones independientes, es decir, el análisis GDL es igual a 0, se puede resolver el problema. Caso contrario es necesario revisar nuevamente las ecuaciones propuestas para evitar sub o sobre especificaciones del sistema.

7. Planteamiento de ecuaciones de balance de materia.

El número de componentes en el sistema definirá el número de ecuaciones independientes.

Es necesario considerar un balance general y balances por componentes.

8. Resolución de las ecuaciones de balance de materia.

Resolver las ecuaciones desde la menos compleja (menor cantidad de variables).

Comprobar los resultados obtenidos, considerando que la cantidad de materia que ingresa al sistema debe ser igual a la cantidad que sale.

Ejemplo 1.3 Columna de Destilación Benceno-Tolueno

La industria petroquímica es la encargada de la elaboración del nylon que se obtiene a partir del benceno, este se hidrogena para obtener ciclohexano que posteriormente se somete a oxidación para conseguir ciclohexanona, la cual produce caprolactama que es el precursor para la producción del nylon.

Cierta compañía requiere obtener benceno para la producción de nylon y dispone de una mezcla de benceno y tolueno. Para separar la mezcla de estos compuestos se utiliza el método de destilación.

A la columna de destilación ingresa una alimentación de 3000 kg/h de una mezcla Benceno-Tolueno, que está compuesto por 50% m/m. A la salida de la columna, en la corriente de la cabeza de la torre de destilación se obtiene el benceno con un valor de flujo másico de 400 kg/h y tolueno, por otro lado, en la corriente de fondo de la torre de destilación se obtiene un flujo másico de tolueno de 425 kg/h y benceno, este proceso se encuentra operando en estado estacionario.

Desarrollar el balance de materia para el benceno y tolueno, con el fin de calcular los flujos másicos desconocidos en las corrientes de cabeza y cola de la columna.

Solución

Paso 1: Dibujar el diagrama de flujo que represente el proceso.

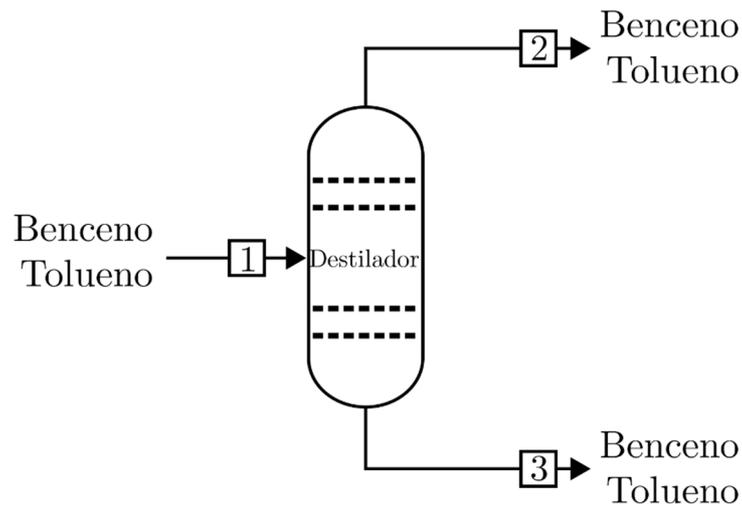


FIGURA DEL EJEMPLO 1.3.1

Columna de destilación

Paso 2: Definir el sistema.

Sistema en estado estacionario, es un separador (columna de destilación).

Paso 3: Elegir los componentes y definir las variables de las corrientes.

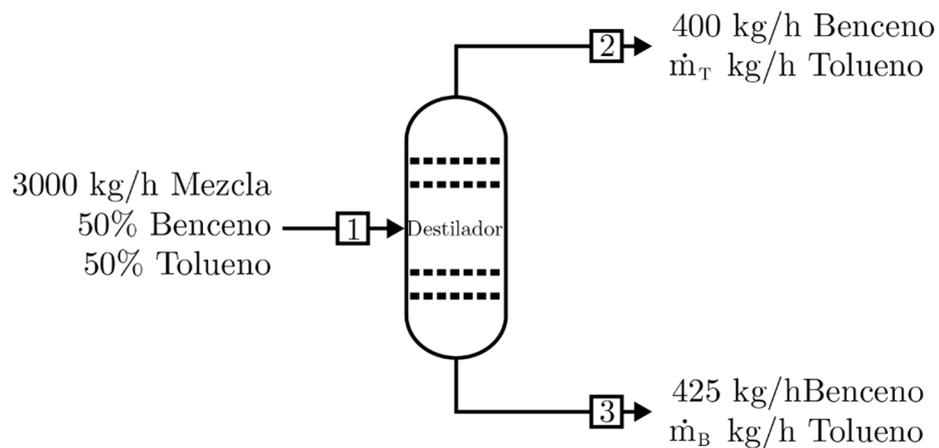


FIGURA DEL EJEMPLO 1.3.2

Columna de destilación

Paso 4. Conversión de unidades.

Los flujos de entrada y salida del sistema se encuentran en las mismas unidades kg/h, se utilizan unidades de masa debido a que no existe una reacción química, aunque también se puede utilizar la unidad (mol) en balances de materia.

Paso 5. Definir una base de cálculo.

Como se definió anteriormente la base de cálculo, se escoge como el flujo total de la corriente de alimentación del proceso, entonces:

Flujo total de la corriente de alimentación (1): $\dot{m}_1 = 3000 \text{ kg/h}$ de mezcla de Benceno-Tolueno.

Paso 6. Realizar el análisis de grados de libertad.

Número de incógnitas: 2 (\dot{m}_{2T} y \dot{m}_{3B})

Número de ecuaciones independientes: 2 (un balance de materia para el benceno y otro balance para el tolueno)

$$\text{Grados de libertad} = 2 \text{ incógnitas} - 2 \text{ ecuaciones independientes} = 0$$

Paso 7. Planteamiento de ecuaciones de balance de materia.

Plantear la ecuación general de balance de materia

$$\text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo} = \text{Acumulación}$$

$$E - S + G - C = A$$

Cuando el sistema es estacionario la acumulación es igual a cero. El problema no presenta ninguna reacción química, por lo cual no existe generación ni consumo. Así, la ecuación general se reduce a:

$$E = S$$

Balance por componentes:

Para el componente benceno:

$$E = S$$

$$\dot{m}_{1B} = \dot{m}_{2B} + \dot{m}_{3B}$$

Para el componente tolueno:

$$E = S$$

$$\dot{m}_{1T} = \dot{m}_{2T} + \dot{m}_{3T}$$

Paso 8: Resolución de las ecuaciones de balance de materia.

En la corriente de entrada

Se tiene 50 % de benceno en la mezcla:

$$\begin{aligned}\dot{m}_1 \times x_B &= \dot{m}_{1B} \\ 3000 \frac{\text{kg de mezcla}}{\text{h}} \times (0.5 \text{ de benceno}) &= 1500 \frac{\text{kg de benceno}}{\text{h}} \\ \dot{m}_1 - \dot{m}_{1B} &= \dot{m}_{1T} \\ 3000 \frac{\text{kg de mezcla}}{\text{h}} - 1500 \frac{\text{kg de benceno}}{\text{h}} &= 1500 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{h}}\end{aligned}$$

Cálculo para el componente benceno en la corriente 3:

$$\begin{aligned}E &= S \\ \dot{m}_{1B} &= \dot{m}_{2B} + \dot{m}_{3B} \\ 1500 \frac{\text{kg de benceno}}{\text{h}} &= 400 \frac{\text{kg de benceno}}{\text{h}} + \dot{m}_{3B} \\ \dot{m}_{3B} &= 1500 \frac{\text{kg de benceno}}{\text{h}} - 400 \frac{\text{kg de benceno}}{\text{h}} \\ \dot{m}_{3B} &= 1100 \frac{\text{kg de benceno}}{\text{h}}\end{aligned}$$

Para el componente tolueno en la corriente 2:

$$\begin{aligned}E &= S \\ \dot{m}_{1T} &= \dot{m}_{2T} + \dot{m}_{3T} \\ 1500 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{h}} &= \dot{m}_{2T} + 425 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{h}} \\ \dot{m}_{2T} &= 1500 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{h}} - 425 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{h}} \\ \dot{m}_{2T} &= 1075 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{h}}\end{aligned}$$

Comprobación:

Se debe comparar las cantidades o flujos totales en las corrientes de entrada con las corrientes de salida:

$$\text{Entrada} = 3000 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Para la salida se suman las corrientes $\dot{m}_2 + \dot{m}_3$:

Para la corriente de cabeza :

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{2T} + \dot{m}_{2B}$$

$$\dot{m}_2 = 1075 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{h}} + 400 \frac{\text{kg de benceno}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_2 = 1475 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Para la corriente de cola:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_{3B} + \dot{m}_{3T}$$

$$\dot{m}_3 = 1100 \frac{\text{kg de benceno}}{\text{h}} + 425 \frac{\text{kg de tolueno}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_3 = 1525 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Entonces:

$$\text{Salida} = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$$

$$\text{Salida} = 1475 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 1525 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Salida} = 3000 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Ejemplo 1.4 Mezcla de Muestras de Metanol

En la industria química y petroquímica la importancia del metanol radica en la diversidad de usos que se le puede dar. Mediante un proceso de oxidación el metanol produce formaldehído, el cual es utilizado para la elaboración de una gran variedad de resinas como urea, formaldehído y melamina-formaldehído que son pegamentos importantes. Otros usos del metanol es la producción de carbonato de dimetilo y metil-t-butil éter MTBE que son usados como aditivos para las gasolinas, además, mediante el proceso conocido como MTG (Transformación de metanol a gasolina sobre zeolita) el metanol puede producir gasolinas sintéticas en un proceso catalizado.

El metanol está siendo investigado para su uso en pilas de combustible y se han realizado pruebas de mezclas de soluciones con diferentes porcentajes en peso. Una de las pruebas consiste en una solución

diluida de metanol (Muestra A) que se mezclará con otra solución que se encuentra al 88% en peso de metanol (Muestra B), con el fin de obtener una solución del 80% en peso (Muestra C).

A medida que transcurre en tiempo la velocidad del flujo y la concentración de la muestra A varía, por lo que se debe reajustar la velocidad de flujo de la muestra B para no alterar la concentración final del metanol utilizando controladores de caudal en cada muestra.

Cada controlador de caudal presenta información de calibración lineal de los flujos máxicos (\dot{m}) y de la lectura del medidor (ψ):

Controlador muestra A		Controlador muestra B	
\dot{m}_A (lb _m /h)	Ψ	\dot{m}_B (lb _m /h)	Ψ
125	30	200	15
500	75	750	65

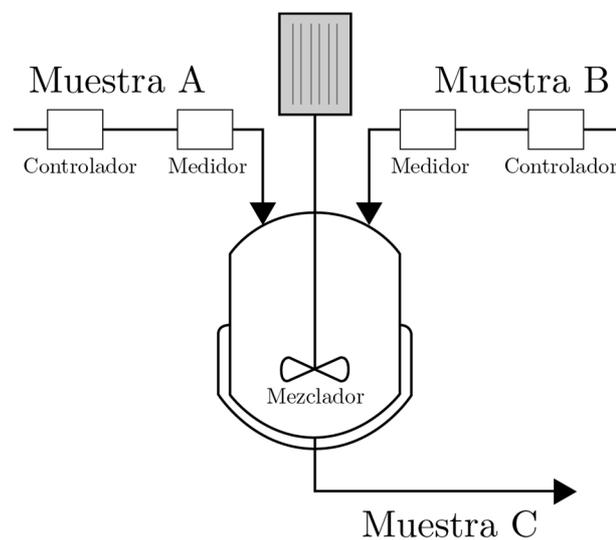


FIGURA DEL EJEMPLO 1.4.1

Mezclador

A partir de la información proporcionada determine:

- a) La velocidad de flujo de la muestra B necesaria para una muestra A de $400 \text{ lb}_m/\text{h}$ de metanol a 60% y la velocidad de flujo final de la muestra C.
- b) En base a los datos presentados por los controladores A y B, calcular los valores de R_A y R_B para las velocidades de flujo y concentraciones de literal a), mediante la derivación de las siguientes ecuaciones de calibración $\dot{m}_A(R_A)$, $\dot{m}_B(R_B)$.

Solución

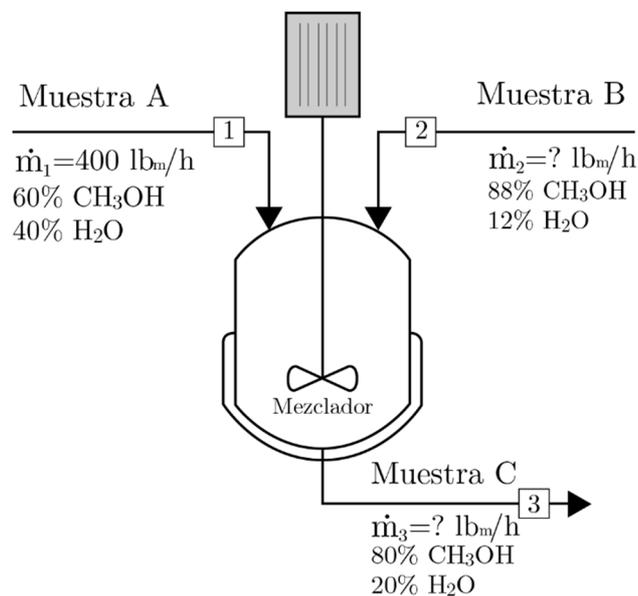


FIGURA DEL EJEMPLO 1.4.2

Composiciones del sistema

El sistema es el mezclador.

Base de cálculo: $400 \text{ lb}_m/\text{h}$

Análisis de grados de libertad:

Número de incógnitas: 2 (\dot{m}_2, \dot{m}_3)

Número de ecuaciones independientes: 2 (un balance para el metanol y un balance general)

$$\text{Grados de libertad} = 2 \text{ incógnitas} - 2 \text{ ecuaciones}$$

$$\text{Grados de libertad} = 0$$

Balance general de materia:

$$E - S + G - C = A$$

El sistema se encuentra en estado estacionario y sin reacción química.

$$E = S$$

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

$$\frac{400 \text{ lb}_m}{h} + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (\text{i})$$

Balance por componentes:

Balance para el metanol:

$$E = S$$

$$0.6\dot{m}_1 + 0.88\dot{m}_2 = 0.8\dot{m}_3$$

$$0.6(400) + 0.88\dot{m}_2 = 0.8\dot{m}_3 \quad (\text{ii})$$

Reemplazar la ecuación (i) en (ii):

$$0.6 \left(\frac{400 \text{ lb}_m}{h} \right) + 0.88\dot{m}_2 = 0.8 \left(\frac{400 \text{ lb}_m}{h} + \dot{m}_2 \right)$$

$$\frac{240 \text{ lb}_m}{h} + 0.88\dot{m}_2 = \frac{320 \text{ lb}_m}{h} + 0.8\dot{m}_2$$

$$\dot{m}_2 = \frac{1000 \text{ lb}_m}{h}$$

Reemplazar el valor de \dot{m}_2 en la ecuación (i):

$$\frac{400 \text{ lb}_m}{h} + \frac{1000 \text{ lb}_m}{h} = \dot{m}_3$$

$$\dot{m}_3 = \frac{1400 \text{ lb}_m}{h}$$

Para el literal b se debe realizar regresión lineal para encontrar la ecuación de la recta $y = A + Bx$ para cada controlador.

Controlador de flujo, muestra A:

$$A = 15$$

$$B = 0.12$$

$$y = A + B\dot{x}$$

En términos del ejercicio:

$$R_1 = A + B\dot{m}_1$$

$$R_1 = 15 + 0.12(400)$$

$$R_1 = 63$$

Controlador de flujo, muestra B:

$$A = -3.18$$

$$B = 0.09$$

$$y = A + B\dot{x}$$

En términos del ejercicio:

$$R_2 = A + B\dot{m}_2$$

$$R_2 = -3.18 + 0.09(1000)$$

$$R_2 = 86.82$$

Ejemplo 1.5 Proceso de Secado de Aire

En muchos procesos químicos y petroquímicos se utilizan columnas de secado, lo cual implica remover la humedad de compuestos deseados. Para esta operación unitaria se usa comúnmente aire. El aire debe ser seco, por lo que, si el aire tiene un porcentaje alto de agua, debería ser previamente secado. Para secar el aire se utilizan esferas de gel de sílice, el agua presente en el aire como vapor se adsorbe a las esferas. Entonces, se suponen 27 kg de esferas de gel de sílice en un tanque, en el mismo entra aire húmedo a 35 °C y a una presión de 1.2 atm, el aire

contiene 2.5% de agua (composición molar), la velocidad de flujo del aire entrante es 3 m³/min. El aire seco obtenido en la salida del tanque contiene 0.1% molar de agua. Se supone una cantidad máxima de adsorción de gel de sílice 0.35 kg/kg de gel de sílice. Calcular el tiempo de operación del tanque en una acumulación máxima.

Solución

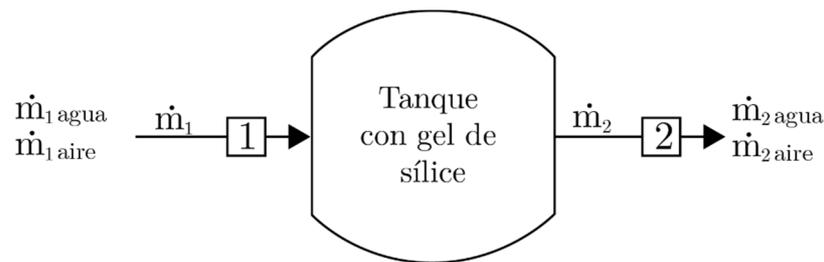


FIGURA DEL EJEMPLO 1.5.1

Secado de aire con gel de sílice

El sistema es un tanque separador en estado no estacionario o intermitente.

En la corriente 1 entra aire húmedo, esto quiere decir que entran aire y agua como un solo componente, como se definió en el diagrama de flujo anterior. En este proceso solo se separará el agua (vapor) del aire con el gel de sílice en el tanque.

En este problema se tiene que obtener una velocidad de flujo en unidades de masa, por lo que se realizará un cambio de unidades a la velocidad de flujo volumétrica. Para este cambio considerar al aire húmedo como gas ideal, y utilizar la ley de los gases ideales.

$$PV=nRT$$

Para hacer un cambio de volumen a masa necesitamos la densidad, en este caso se obtendrá la densidad molar:

$$\frac{n}{V} = \frac{P}{RT}$$

$$\frac{n}{V} = \frac{1.2 \text{ atm}}{\left(0.082056 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}}\right) (35+273.15)\text{K}} = 0.0475 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

Se sabe que $\rho = m/V$, entonces, se utilizará la densidad molar para convertir el flujo volumétrico en flujo másico:

$$3 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times 0.0475 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times \frac{1000\text{L}}{1\text{m}^3} = 142.5 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

El flujo molar de entrada de aire húmedo es:

$$\dot{n}_1 = 142.5 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

Ahora se definen las corrientes y sus composiciones en el diagrama de flujo:



FIGURA DEL EJEMPLO 1.5.2

Sistema de secado

Se obtendrán relaciones de flujos molares para cada componente utilizando las fracciones molares:

$$y_{\text{Agua},1} = \frac{\dot{n}_{1\text{agua}}}{\dot{n}_{1\text{agua}} + \dot{n}_{1\text{aire}}} = 0.025 \frac{\text{mol agua}}{\text{moles totales}}$$

$$y_{\text{Agua},2} = \frac{\dot{n}_{2\text{agua}}}{\dot{n}_{2\text{agua}} + \dot{n}_{2\text{aire}}} = 0.001 \frac{\text{mol agua}}{\text{moles totales}}$$

Para obtener la acumulación máxima de agua en el tanque se relaciona la masa de gel de sílice con su capacidad de retener agua:

$$\begin{aligned} 27 \text{ kg de gel} &\times 0.35 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg de gel de sílice}} \times \frac{1 \text{ 000g}}{1\text{kg}} \times \frac{1\text{mol}}{18\text{g de agua}} = \\ &= 525 \text{ moles de agua} \end{aligned}$$

Se requiere especificar la acumulación en función del tiempo:

$$\dot{n}_{\text{agua acumulada}} = \frac{525 \text{ mol agua}}{t} \quad (\text{i})$$

Balance general de materia:

$$E-S+G-C=A$$

El sistema se encuentra en estado no estacionario y sin reacción química:

$$E-S=A$$

Balance por componentes:

Para el aire no existe acumulación:

$$\dot{n}_{1\text{aire}} = \dot{n}_{2\text{aire}}$$

Para el agua si existe acumulación:

$$\dot{n}_{1\text{agua}} - \dot{n}_{2\text{agua}} = \dot{n}_{\text{agua acumulada}}$$

Se resuelven las ecuaciones para obtener los valores de las corrientes:

$$\dot{n}_{1\text{aire}} = y_{\text{aire},1} \times \dot{n}_1$$

$$\dot{n}_{1\text{aire}} = 0.975 \frac{\text{mol aire}}{\text{mol}} \times 142.5 \frac{\text{mol}}{\text{min}} = 138.9375 \frac{\text{mol aire}}{\text{min}}$$

$$\dot{n}_{1\text{aire}} = \dot{n}_{2\text{aire}}$$

$$\dot{n}_{2\text{aire}} = 138.9375 \frac{\text{mol aire}}{\text{min}}$$

Para el aire:

$$\frac{\dot{n}_{2\text{agua}}}{\dot{n}_{2\text{agua}} + \dot{n}_{2\text{aire}}} = 0.001 \frac{\text{mol agua}}{\text{mol}}$$

$$\dot{n}_{2\text{agua}} = 0.001 \frac{\text{mol agua}}{\text{mol}} (\dot{n}_{2\text{agua}} + \dot{n}_{2\text{aire}})$$

$$\dot{n}_{2\text{agua}} - \left(0.001 \frac{\text{mol agua}}{\text{mol}}\right) \dot{n}_{2\text{agua}} = \left(0.001 \frac{\text{mol agua}}{\text{mol}}\right) \dot{n}_{2\text{aire}}$$

$$\dot{n}_{2\text{agua}} = \frac{\left(0.001 \frac{\text{mol agua}}{\text{mol}}\right) \times 138.9375 \frac{\text{mol}}{\text{min}}}{0.999} = 0.1391 \frac{\text{mol agua}}{\text{min}}$$

$$\dot{n}_{1\text{agua}} = 3.5625 \frac{\text{mol agua}}{\text{min}}$$

$$\dot{n}_{1\text{agua}} - \dot{n}_{2\text{agua}} = \dot{n}_{\text{agua acumulada}}$$

$$\dot{n}_{\text{agua acumulada}} = 3.5625 \frac{\text{mol agua}}{\text{min}} - 0.1391 \frac{\text{mol agua}}{\text{min}} = 3.4234 \frac{\text{mol agua}}{\text{min}}$$

Para obtener el tiempo se despeja de la ecuación (i):

$$\dot{n}_{\text{agua acumulada}} = \frac{525 \text{ mol agua}}{t}$$

$$t = 153.3563 \text{ min}$$

En este tiempo el tanque, ya no tendría la capacidad para adsorber más agua.

Ejemplo 1.6 Proceso de Secado en Frío

Se requiere secar una corriente gaseosa que contenga 30% de O_2 , 60% de H_2 y 10% de H_2O (composición molar), enfriando la corriente de gas y condensando el agua. Si 80 mol/h de corriente de gas se va a procesar, ¿cuál es la velocidad de flujo molar del agua condensada y la composición del gas seco?

Solución

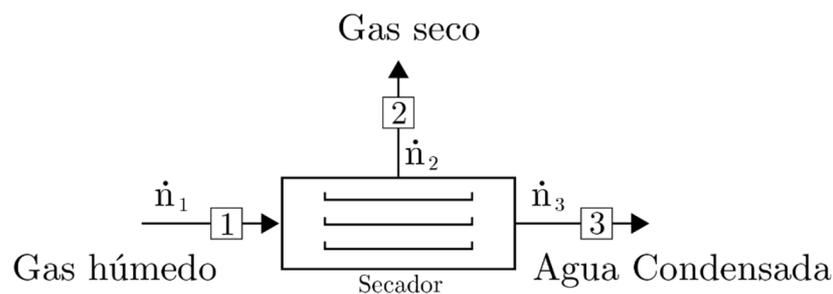


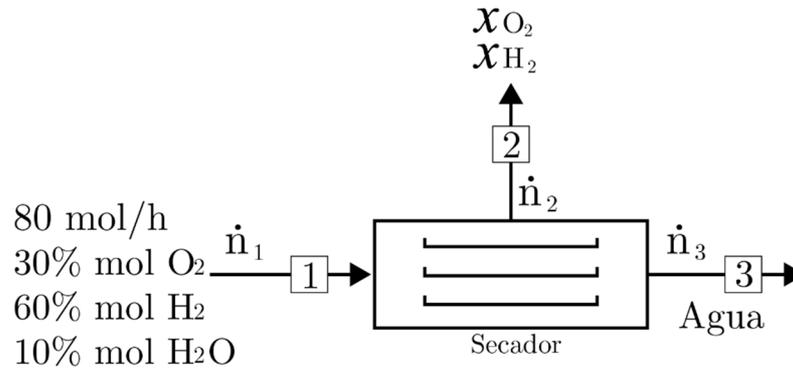
FIGURA DEL EJEMPLO 1.6.1

Proceso de secado en frío

Es un proceso de secado en estado estacionario.

Base de cálculo: 80 mol/h.

Las composiciones en las corrientes son:

**FIGURA DEL EJEMPLO 1.6.2**

Composiciones del proceso de secado

Análisis de grados de libertad:

Número de incógnitas: 3 (\dot{n}_2 y \dot{n}_3 , $x_{O_2,2}$)

Número de ecuaciones independientes: 3 (un balance de materia para el aire, agua e hidrógeno).

Balance total de materia (en estado estacionario):

$$E=S$$

$$\dot{n}_1 = \dot{n}_2 + \dot{n}_3$$

$$80 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = \dot{n}_2 + \dot{n}_3 \quad (\text{i})$$

Balance por componente:

Para agua:

$$\dot{n}_{1 \text{ agua}} = \dot{n}_{3 \text{ agua}}$$

$$\dot{n}_1 \times 0.1 \frac{\text{mol agua}}{\text{mol total}} = \dot{n}_{3 \text{ agua}}$$

$$80 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \times 0.1 \frac{\text{mol agua}}{\text{mol total}} = \dot{n}_3 \text{ agua}$$

$$8 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = \dot{n}_3 \text{ agua} \quad (\text{ii})$$

Para oxígeno:

$$\dot{n}_1 \text{ oxígeno} = \dot{n}_2 \text{ oxígeno}$$

$$\dot{n}_1 \times 0.3 \frac{\text{mol oxígeno}}{\text{mol total}} = \dot{n}_2 \times x_{\text{O}_2,2}$$

$$80 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \times 0.3 \frac{\text{mol oxígeno}}{\text{mol total}} = \dot{n}_2 \times x_{\text{O}_2,2}$$

$$24 \frac{\text{mol oxígeno}}{\text{h}} = \dot{n}_2 \times x_{\text{O}_2,2} \quad (\text{iii})$$

Se resuelven las ecuaciones:

Con el valor calculado de $\dot{n}_3 \text{ agua}$:

$$\dot{n}_3 = \dot{n}_3 \text{ agua}$$

$$80 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = \dot{n}_2 + \dot{n}_3 \quad (\text{iv})$$

Se reemplaza la ecuación (i) en (iv):

$$80 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - 8 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = \dot{n}_2$$

$$\dot{n}_2 = 72 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \quad (\text{v})$$

La fracción molar de hidrogeno en el gas seco será:

Se reemplaza la ecuación (v) en (iii):

$$24 \frac{\text{mol oxígeno}}{\text{h}} = \dot{n}_2 \times x_{\text{O}_2,2}$$

$$24 \frac{\text{mol oxígeno}}{\text{h}} = 72 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \times x_{\text{O}_2,2}$$

$$\frac{24 \frac{\text{mol oxígeno}}{\text{h}}}{72 \frac{\text{mol}}{\text{h}}} = x_{\text{O}_2,2}$$

$$0.3333 = x_{\text{O}_2,2}$$

Ejemplo 1.7 Evaporador

En procesos petroquímicos y químicos un método de separación es la evaporación. Se alimentan tres corrientes de flujo a un evaporador, para producir una corriente de salida con la composición deseada. Se alimenta agua a un flujo volumétrico de $30 \text{ cm}^3/\text{min}$, aire (21% mol de O_2 , 79% N_2) y oxígeno puro, el flujo de oxígeno puro es alimentado como una tercera parte del caudal molar de la corriente de aire. Se realiza un análisis al gas de salida y se encuentra que contiene 2% en moles de agua. Calcular todas las variables de flujo desconocidas.

Solución

Se traza el diagrama y se define las variables de corriente:

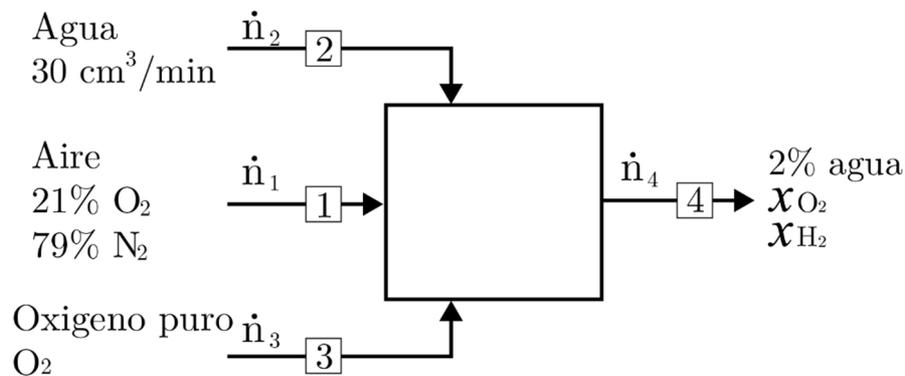


FIGURA DEL EJEMPLO 1.7.1

Cámara de evaporación

El sistema es una cámara de evaporación en estado estacionario.

La base de cálculo será:

$$\dot{V} = 30 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

Se requiere cambiar de unidades a flujo molar:

$$\dot{m}_2 = \dot{V} \times \rho = \left(30 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right) \left(\frac{1\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = 30 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

$$M_{\text{agua}} = 18 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\dot{n}_2 = 30 \frac{\text{g}}{\text{min}} \times \frac{1}{M_{\text{agua}}} = 30 \frac{\text{g}}{\text{min}} \times \frac{1}{18 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 1.6667 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

Se define las variables del sistema:

El flujo molar de oxígeno puro es una tercera parte del flujo molar de aire:

$$\dot{n}_3 = \frac{1}{3} \dot{n}_1 \quad (\text{i})$$

Balance de materia general:

$$E = S$$

$$\dot{n}_1 + \dot{n}_2 + \dot{n}_3 = \dot{n}_4 \quad (\text{ii})$$

Se reemplaza la ecuación (i) en (ii):

$$\dot{n}_1 + 1.6667 \frac{\text{mol}}{\text{min}} + \frac{1}{3} \dot{n}_1 = \dot{n}_4 \quad (\text{iii})$$

Balance por componentes:

Para el agua:

En la corriente dos solo entra agua, por lo tanto, se toma como el flujo total, \dot{n}_2 . Sin embargo, en la corriente 4 existirán tres componentes (O_2 , N_2 , H_2O), entonces:

$$\dot{n}_2 = \dot{n}_{4 \text{ agua}} = x_{\text{H}_2\text{O},4} \times \dot{n}_4$$

$$\dot{n}_{4 \text{ agua}} = 0.02 \dot{n}_4$$

$$\dot{n}_2 = 0.02 \dot{n}_4$$

$$\dot{n}_4 = \frac{\left(1.6667 \frac{\text{mol}}{\text{min}}\right)}{0.02} = 83.335 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \quad (\text{iv})$$

Se obtiene el flujo molar de la corriente 1, de la ecuación de balance general:

Se reemplaza la ecuación (iv) en (i):

$$\dot{n}_1 + 1.6667 \frac{\text{mol}}{\text{min}} + \frac{1}{3} \dot{n}_1 = 83.335 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$1.3333 \dot{n}_1 = 81.6683 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$\dot{n}_1 = 61.2528 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \quad (\text{v})$$

Para el nitrógeno (N_2):

$$\dot{n}_{1 \text{ N}_2} = \dot{n}_{4 \text{ N}_2}$$

$$0.79 \dot{n}_1 = x_{\text{N}_2,4} \times \dot{n}_4 \quad (\text{vi})$$

Se reemplaza las ecuaciones (iv) y (v) en (vi):

$$\frac{\left(0.79 \times 61.2528 \frac{\text{mol}}{\text{min}}\right)}{83.335 \frac{\text{mol}}{\text{min}}} = x_{\text{N}_2,4}$$

$$x_{\text{N}_2,4} = 0.5807$$

Se calcula la fracción molar del oxígeno en la corriente de salida:

$$x_{\text{O}_2,4} + x_{\text{N}_2,4} + x_{\text{H}_2\text{O},4} = 1 \quad (\text{vii})$$

Se reemplaza $x_{\text{N}_2,4}$ y $x_{\text{H}_2\text{O},4}$ en la ecuación (vii):

$$x_{\text{O}_2,4} + 0.5807 + 0.02 = 1$$

$$x_{\text{O}_2,4} = 0.3993$$

Se verifica si la respuesta cumple con la ecuación de balance de materia para el oxígeno:

$$\dot{n}_1 \text{O}_2 + \dot{n}_3 \text{O}_2 = \dot{n}_4 \text{O}_2$$

$$0.21\dot{n}_1 + \frac{1}{3}\dot{n}_1 = x_{\text{O}_2,4} \times \dot{n}_4 \quad (\text{viii})$$

Se reemplaza el valor de $x_{\text{O}_2,4}$ y las ecuaciones (iv) y (v) en (viii):

$$0.21 \left(61.2528 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \right) + \left(\frac{1}{3} \right) \left(61.2528 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \right) = (0.3993) \left(83.335 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \right)$$

$$33.3 = 33.3$$

Ejemplo 1.8 Vaporización parcial

Una mezcla de benceno-tolueno ingresa a un evaporador con una composición de 60% de benceno en masa. A la mezcla se le someterá a una evaporación parcial para producir un vapor que contenga 87.0% de benceno y un líquido residual que contenga 10.5% de benceno en masa. El proceso se va a realizar de forma continua en estado estacionario y la mezcla se alimenta con un flujo másico de 110 kg/h. Dibujar y etiquetar un diagrama de flujo del proceso. Encontrar los caudales y composiciones desconocidas.

Solución

Diagrama del proceso en donde se indican corrientes, los valores conocidos y desconocidos:

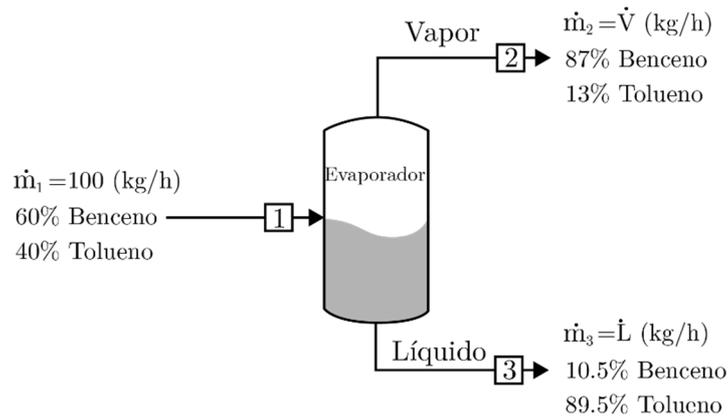


FIGURA DEL EJEMPLO 1.8.1

Esquema de proceso de evaporación parcial de benceno-tolueno

Análisis de grados de libertad:

Número de incógnitas: 2 (\dot{m}_2, \dot{m}_3)

Número de ecuaciones independientes: 2 (un balance para el benceno y un balance general)

Grados de libertad = 2 incógnitas - 2 ecuaciones

Grados de libertad = 0

Balance general de materia:

$$E - S + G - C = A$$

Proceso en estado estacionario y sin reacción química, los términos de generación, consumo y acumulación valen cero:

$$E = S$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$$

$$110 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$$

$$110 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - \dot{m}_3 = \dot{m}_2 \quad (\text{i})$$

Balance de materia para el benceno:

$$E=S$$

$$\dot{m}_{1B}=\dot{m}_{2B}+\dot{m}_{3B}$$

$$(0.6) \left(110 \frac{\text{kg}}{\text{h}}\right) = 0.87\dot{m}_2 + 0.105\dot{m}_3 \quad (\text{ii})$$

Reemplazar (i) en (ii):

$$(0.6) \left(110 \frac{\text{kg}}{\text{h}}\right) = 0.87 \left(110 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - \dot{m}_3\right) + 0.105\dot{m}_3$$

$$66 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 95.7 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 0.87\dot{m}_3 + 0.105\dot{m}_3$$

$$0.765\dot{m}_3 = 29.7 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_3 = 38.823 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Reemplazar \dot{m}_3 en el balance general:

$$100 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 38.823 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = \dot{m}_2$$

$$\dot{m}_2 = 61.177 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Ejemplo 1.9 Columna de Destilación Multicomponente

A una columna de destilación ingresa una mezcla de etanol (E), propanol (P) y butanol (B) con un flujo molar de 110 mol/h, por la corriente de cabeza (destilado) se obtiene 2/3 de etanol y nada de butanol, y en la corriente de fondo no existe presencia de etanol. Calcular los flujos de las corrientes de salida y sus composiciones.

Solución

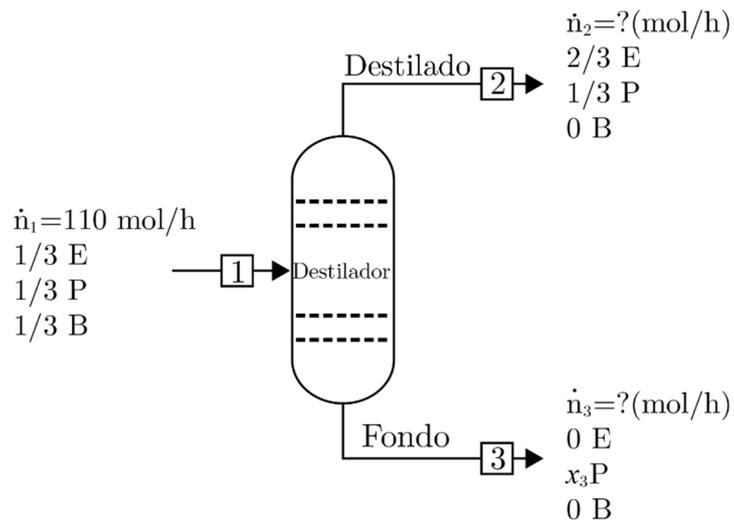


FIGURA DEL EJEMPLO 1.9.1

Esquema de destilación multicomponente

Análisis de grados de libertad:

Número de incógnitas: 3 ($\dot{n}_2, \dot{n}_3, x_{P,3}$)

Número de ecuaciones independientes: 3 (un balance para el etanol, un balance para el propanol y un balance general)

Grados de libertad=3 incógnitas-3 ecuaciones

Grados de libertad=0

Balance general de materia:

$$E-S+G-C=A$$

Proceso en estado estacionario y sin reacción química, los términos de generación, consumo y acumulación valen cero.

$$E=S$$

$$\dot{n}_1 = \dot{n}_2 + \dot{n}_3$$

$$110 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = \dot{n}_2 + \dot{n}_3$$

Balance de materia para el etanol (E):

$$E=S$$

$$\dot{n}_{1E}=\dot{n}_{2E}+\dot{n}_{3E}$$

$$\left(\frac{1}{3}\right) \left(110 \frac{\text{mol}}{\text{h}}\right) = \frac{2}{3} \dot{n}_2 + 0 \times \dot{n}_3$$

$$\left(\frac{1}{3}\right) \left(110 \frac{\text{mol}}{\text{h}}\right) = \frac{2}{3} \dot{n}_2 + 0 \times \dot{n}_3$$

$$55 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = \dot{n}_2$$

Reemplazar \dot{n}_2 en el balance general:

$$110 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 55 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + \dot{n}_3$$

$$\dot{n}_3 = 55 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Balance de materia para el propanol (P):

$$E=S$$

$$\dot{n}_{1P}=\dot{n}_{2P}+\dot{n}_{3P}$$

$$\left(\frac{1}{3}\right) \left(110 \frac{\text{mol}}{\text{h}}\right) = \frac{1}{3} \dot{n}_2 + x_{P,3} \dot{n}_3$$

$$\left(\frac{1}{3}\right) \left(110 \frac{\text{mol}}{\text{h}}\right) = \frac{1}{3} \left(55 \frac{\text{mol}}{\text{h}}\right) + 55 \frac{\text{mol}}{\text{h}} x_{P,3} \quad (\text{dividir la ecuación para } 55)$$

$$\left(\frac{1}{3}\right) (2) = \frac{1}{3} + x_{P,3}$$

$$x_{P,3} = \frac{1}{3}$$

Ejemplo 1.10 Síntesis de Mermelada de Piña

Una empresa de alimentos busca producir mermelada de piña, para ello se tritura piña que contiene 15% en peso de sólidos y 85% en peso de agua. Se mezclan toda la piña triturada y el endulzante (azúcar). Para que la mermelada tenga suficiente dulzor se mezcla la fruta y el

azúcar en una proporción de masa de $4/5$ y la mezcla se calienta para evaporar el agua. El residuo del proceso tiene un cuarto de agua en masa.

Calcular:

- La cantidad de fruta que debe ingresar para producir 100 kg de mermelada.
- La cantidad de agua evaporada.

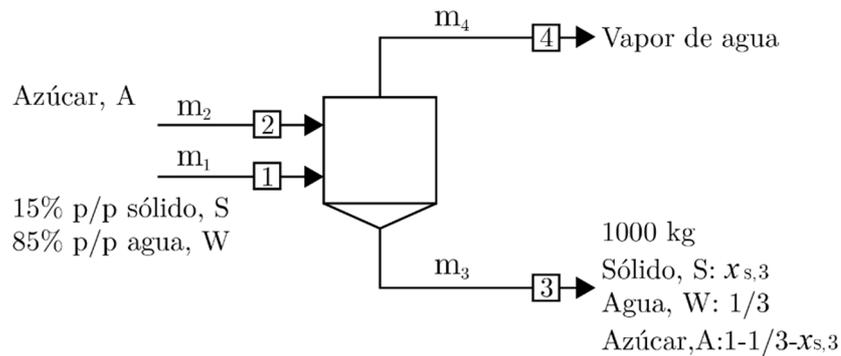


FIGURA DEL EJEMPLO 1.10.1

Esquema de evaporador

Balance general de materia:

$$E - S + G - C = A$$

Se trata de un sistema estacionario; $A=0$, no existe alguna reacción en el proceso por lo tanto G y $C=0$.

$$E = S$$

$$m_1 + m_2 = m_3 + m_4$$

$$m_1 + m_2 = m_4 + 1000 \text{ kg} \quad (\text{i})$$

Proporción de la mezcla que ingresa al evaporador:

$$\frac{\text{Fruta}}{\text{Azúcar}} = \frac{m_1}{m_2} = \frac{4}{5} = 0.8$$

$$m_2 = 1.25 m_1 \quad (\text{ii})$$

Balance por componentes:

Balance de sólidos:

$$0.15 m_1 = x_{s,3} m_3$$

$$0.15 m_1 = x_{s,3} (1000 \text{ kg}) \quad (\text{iii})$$

Balance del agua:

$$0.85 m_1 = m_4 + \frac{1}{4} m_3$$

$$0.85 m_1 = m_4 + \frac{1}{4} (1000 \text{ kg}) \quad (\text{iv})$$

Reemplazar la ecuación (ii) en la ecuación (i):

$$m_1 + 1.25 m_1 = m_3 + 1000 \text{ kg}$$

$$2.25 m_1 = m_4 + 1000 \text{ kg}$$

$$m_1 = \frac{m_4 + 1000 \text{ kg}}{2.25} \quad (\text{v})$$

Reemplazar la ecuación (v) en la ecuación (iv) para obtener el valor de m_4 :

$$0.85 \left(\frac{m_4 + 1000 \text{ kg}}{2.25} \right) = m_4 + \frac{1}{4} (1000 \text{ kg})$$

$$m_4 = 205.35 \text{ kg}$$

Reemplazar m_4 en la ecuación (v) para obtener el valor de m_1 :

$$m_1 = \frac{205.35 \text{ kg} + 1000 \text{ kg}}{2.25}$$

$$m_1 = 535.71 \text{ kg}$$

Reemplazar m_1 en la ecuación (ii) y (iii) para obtener el valor de m_2 y la fracción de sólidos $x_{s,3}$ en la mermelada respectivamente:

$$m_2 = 1.25 m_1$$

$$m_2 = 1.25 (535.71 \text{ kg})$$

$$m_2 = 669.63 \text{ kg}$$

$$0.15 m_1 = x_{s,3} (1000 \text{ kg})$$

$$0.15 (535.71 \text{ kg}) = x_{s,3} (1000 \text{ kg})$$

$$x_{s,3}=0.0803$$

Ejemplo 1.11 Secado de Membrana Polimérica

La ingeniería de tejidos ha tratado de enfocarse en la generación de fibras de aplicabilidad biomédica, para ello, experimentalmente se secarán 5 kilogramos de membrana de una fibra hueca polimérica húmeda con ayuda de un horno. La relación con la que ingresan las fibras húmedas al secador son 1.5 kg H₂O por kilogramo de membrana seca. En el producto se debe obtener una membrana al 20% de humedad. Determine los valores de los flujos totales de salida del agua evaporada y el producto.

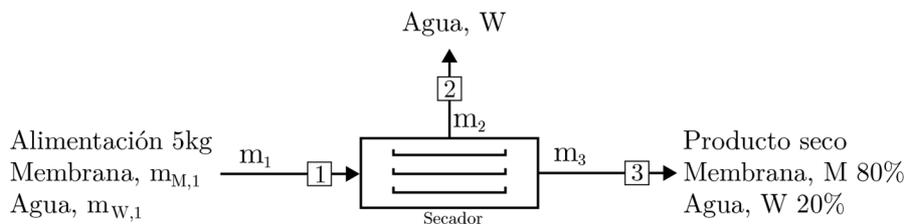


FIGURA DEL EJEMPLO 1.11.1

Esquema de secador de membrana

Balance general:

$$E-S+G-C=A$$

Se trata de un sistema estacionario; $A=0$, no existe alguna reacción en el proceso por lo tanto G y $C=0$.

$$E=S$$

$$m_1=m_2+m_3$$

$$5 \text{ kg}=m_2+m_3 \quad (\text{i})$$

Balance por componentes:

Balance en la alimentación:

$$m_{M,1}+m_{W,1}=5 \quad (\text{ii})$$

Balance de materia de la membrana, M:

$$m_{M,1} = 0.8 m_2 \quad (\text{iii})$$

Relación que ingresa de agua por kg de membrana seca:

$$\frac{m_{W,1}}{m_{M,1}} = \frac{1.5}{1}$$

$$m_{W,1} = 1.5 m_{M,1} \quad (\text{iv})$$

Reemplazar la ecuación (iv) en la ecuación (ii) para determinar los valores de $m_{M,1}$, $m_{W,1}$:

$$m_{M,1} + 1.5 m_{M,1} = 5$$

$$m_{M,1} = 2 \text{ kg}$$

$$m_{W,1} = 1.5$$

$$m_{W,1} = 3 \text{ kg}$$

Reemplazar los valores encontrados en la ecuación (iii) y (i) para determinar los valores de m_2 :

$$m_{M,1} = 0.8 m_2$$

$$2 = 0.8 m_2$$

$$m_2 = 2.5 \text{ kg}$$

$$5 \text{ kg} = 2.5 \text{ kg} + m_3$$

$$m_3 = 2.5 \text{ kg}$$

Ejercicios propuestos

1. En un evaporador entra agua con un caudal de 10 mol/h y en la salida su caudal es de 5 mol/h.
 - a) Señale que tipo de proceso (semicontinuo, intermitente o continuo), y si se encuentra en estado estacionario o no estacionario.

b) Desarrolle la ecuación general de balance de materia, explicando cada término de la misma.

2. En un recipiente agitado se pretende obtener 100 kg de una solución acuosa de cloruro de sodio a un 8% en peso. En el recipiente se tiene una solución de 5% de cloruro de sodio. Encontrar la cantidad de cloruro de sodio puro a añadir en el recipiente.

3. Una columna de destilación es alimentada por 100kg/h de una mezcla de amoníaco-agua, donde 20% es de amoníaco (A) y un 80% de agua (W) en peso, el destilado tiene un 65% de amoníaco, y el destilado es producido a razón de una octava parte de la alimentación. Dibujar el diagrama de flujo y calcular las composiciones de cada corriente.

4. Desde una torre de destilación atmosférica en una refinería, se obtiene una corriente gaseosa compuesta por propano y butano con una composición molar de 0.19 y 0.81 respectivamente, esta corriente ingresa a un condensador en donde se condensa el 91% de esta mezcla. La corriente líquida de salida del condensador tiene una velocidad de flujo de 55 mol/h con una composición molar de propano y butano del 0.15 y 0.85 respectivamente. Calcular:

a) El flujo molar total y de cada componente que ingresa al condensador.

b) El flujo molar total y de cada componente en la corriente de salida del vapor.

c) Composiciones molares de la corriente de vapor.

d) Flujo molar de cada componente en la corriente de salida del líquido.

5. En un laboratorio es diseñada una unidad que separe el aire en dos corrientes. La composición de nitrógeno en una de las corrientes es del 92%, con un 90% de nitrógeno de la alimentación al proceso. Calcular los caudales molares de oxígeno y nitrógeno en las corrientes de salida del proceso.

Determine la composición molar de oxígeno en las corrientes de producto. Considere: aire (21% oxígeno y 79% nitrógeno), 100 mol/h en la alimentación.

6. En un proceso de destilación simple se separa una mezcla de hidrocarburos (propano, isobutano, n-butano y pentano), todo el propano sale en la corriente de destilado con el 65% de isobutano de la alimentación. La composición de n-butano en la corriente de destilado es de 0.2. En el fondo de la columna sale todo el pentano presente en la mezcla alimentada al proceso de destilación. Asuma un caudal másico en la alimentación de 150 kg/h.

7. Para secar una corriente gaseosa que contiene agua, hidrógeno y oxígeno, se emplea el método de secado en frío. El agua presente en la corriente de gas se condensa completamente para ser separada. En la corriente de condensado se tiene 25 kmol/h de agua, además en la corriente de producto gaseosa se tiene 100 kmol/h de hidrógeno con una composición molar de 40%. Calcular todos los caudales y las composiciones molares del proceso.

8. En procesos industriales se producen lodos con grandes cantidades de agua, se implementa métodos para separar las partículas sólidas del líquido como la centrifugación. Se requiere reducir el contenido de líquido (H_2O) en las partículas de carbonato de calcio hasta un 7%. El lodo contiene 51% de líquido.

9. Se alimenta 1500 kg/h a una columna de destilación, la composición de la corriente es 45% tolueno y 55% benceno en peso. La corriente de destilado contiene 5% en peso de tolueno, y la corriente de fondo contiene 8% en peso de benceno. Calcular:

a) El porcentaje de recuperación de benceno en el destilado.

b) La cantidad másica de cada componente en las dos corrientes de productos.

10. En un sedimentador se alimenta una corriente compuesta de 65% en moles de agua y 35 % en moles de aceite. Una corriente de producto del sedimentador contiene solamente aceite, y la otra corriente contiene 80% de agua. Calcular los caudales de las corrientes de salida del sedimentador.

11. Se introducen 3 corrientes gaseosas a un mezclador. La corriente A tiene una composición de 65% molar de metano (CH_4), 20% de propano (C_3H_8) y 15% de butano (C_4H_{10}); la corriente B está compuesta de 75% de propano y 25% de butano; en la corriente C se encuentra 10% molar de metano (CH_4) y 90% de butano (C_4H_{10}). Calcular el caudal molar de A, B y C necesario para obtener 150 mol/h en la corriente de producto del mezclador, con composiciones iguales para los 3 componentes (metano, propano, butano).

12. El hexano es utilizado como solvente en la extracción aceite vegetal de una semilla, este proceso da como producto una proteína vegetal y celulosa en diferentes corrientes. La alimentación contiene 20% de celulosa, 45 % de proteína vegetal y 35% aceite vegetal. Calcular las composiciones de todas las corrientes del proceso. Dato: Utilizando 7 kg de hexano se obtiene 2 kg de proteína vegetal.

13. En la producción de granos integrales como el trigo, es requerida cierta cantidad de agua en el grano. Por tal razón, el trigo con un contenido en agua del 10.5% entra a un molino para aumentar el agua al 14% en moles. Si inicialmente el grano contiene 20 moles de agua, ¿Qué cantidad de agua es requerida en el molino para conseguir la composición deseada?

14. En una industria productora de bebidas alcohólicas se requiere tener una bebida con 40% en moles de etanol. Para esto se mezclan dos corrientes

de etanol, una corriente tiene un caudal molar de 325 mol/h con un contenido de 32% en etanol y el resto en agua; la segunda corriente contiene 72% en etanol. Calcular el caudal molar de la segunda corriente para obtener el producto deseado.

Referencias

- Felder, R., & Rousseau, R. (2004). *3 Felder-Balance masa.pdf*. Limusa Wiley.
- GARAVITO, N. G. (2009). *Balance De Materia*.
- Ghasem, N., & Henda, R. (2014). *Principles of Chemical Engineering Processes: Material and Energy Balances* (Second). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b17696>
- Matar, S., & Hatch, L. F. (1994). *Chemistry of Petrochemical Processes*. Gulf Publishing.
- Morris, A. E., Geiger, G., & Fine, H. A. (2011). *Handbook on Material and Energy Balance Calculations in Materials Processing*. Wiley.
- Murphy, R. M. (2007). *Introducción a los Procesos Químicos: Principios, análisis y síntesis*. McGraw-Hill Interamericana.

2

Balance de materia para múltiples unidades de proceso

Los procesos industriales pocas veces incluyen una unidad de proceso, la mayoría tienen múltiples unidades de proceso. En este capítulo se detallarán las características de sistemas que abarquen varias unidades de procesos considerando sistemas y subsistemas en función de simplificar el análisis de los balances de materia, los grados de libertad, y la inclusión de corrientes particulares de un proceso.

Objetivos de aprendizaje

- Definir y explicar las características de los balances de materia de procesos que abarquen múltiples unidades.
- Emplear el análisis de grados de libertad y las ecuaciones de balance de materia para problemas con múltiples unidades de proceso.
- Definir los tipos de corrientes de recirculación, realimentación, baipás y purga presentes en los balances de materia que involucran varias unidades de proceso.

2.1 Proceso de múltiples unidades

Cuando se encuentran varias unidades en un mismo proceso, se hace referencia al término “sistema” como el proceso en general, es decir, abarca todas las unidades presentes en el proceso, las entradas y salidas serán las corrientes que atraviesen la frontera del sistema. El término “subsistema” se puede emplear para un punto específico, por ejemplo, al elegir una unidad de proceso o un punto en el que se unen dos corrientes como un subsistema.

En la figura 2.1 se muestra un proceso de dos unidades, mezcla de corrientes, recirculación y purga. En este proceso se pueden definir cinco subsistemas delimitados por una frontera.

La extensión de la frontera (F1) se define como el sistema general; esta frontera encierra el proceso completo, el balance para ese sistema se denomina balance general tomando en cuenta de forma única las corrientes que cruzan la frontera (F1).

Las fronteras (F2, F3, F4 y F5) se definen como subsistemas. Cada frontera abarca una unidad o punto específico, punto de mezcla (F2), unidad uno (F3), unidad dos (F4), divisor (F5).

El sistema tiene una corriente de entrada (E1) y tres corrientes de salida (S1, S2 y Purga).

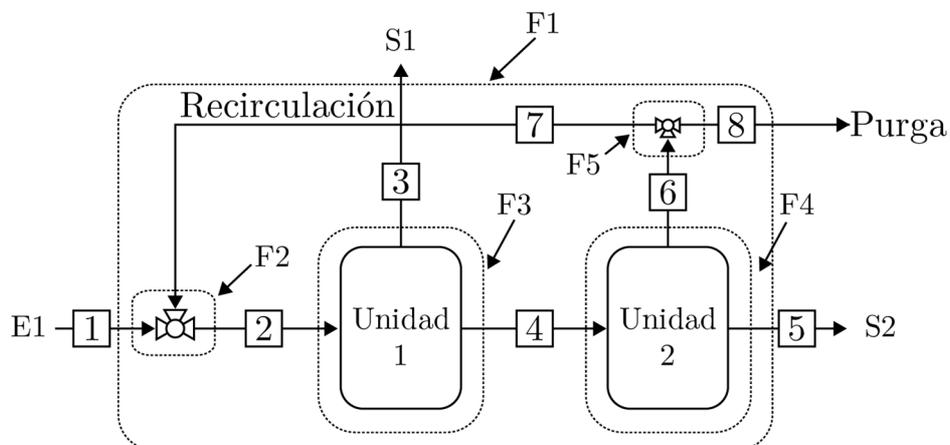


FIGURA 2.1

Delimitación de frontera del sistema y subsistemas.

El balance de materia se aplica al sistema general y a cada subsistema que constituye el proceso de múltiples unidades, la ecuación se expresa como:

$$\text{entrada-salida}=\text{acumulación}$$

2.2 Análisis de grados de libertad

De acuerdo a lo definido en la sección anterior, para realizar un análisis adecuado de un proceso que englobe múltiples unidades, se requiere el aislamiento de subsistemas y la aplicación de balances de materia específicos para cada subsistema. El objetivo es determinar todas las variables desconocidas del proceso. Se recomienda realizar un análisis de grados de libertad para cada sistema con el fin de deducir si el problema está completamente definido, sobre especificado o sub especificado. Con un valor de grados de libertad igual a cero las ecuaciones de balance de materia del sistema están en equilibrio, por tanto, el problema tiene una única solución.

Ejemplo 2.1 Análisis de Grados de Libertad de Múltiples Unidades

Para los diagramas de flujo de un proceso con varias unidades mostrados en las siguientes figuras, efectúe el análisis de grados de libertad para cada diagrama.

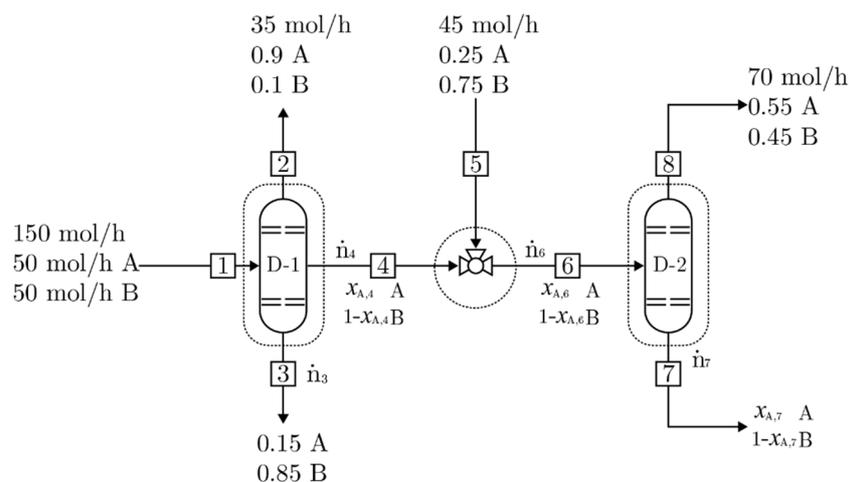


FIGURA DEL EJEMPLO 2.1.1

Esquema para análisis de grados de libertad

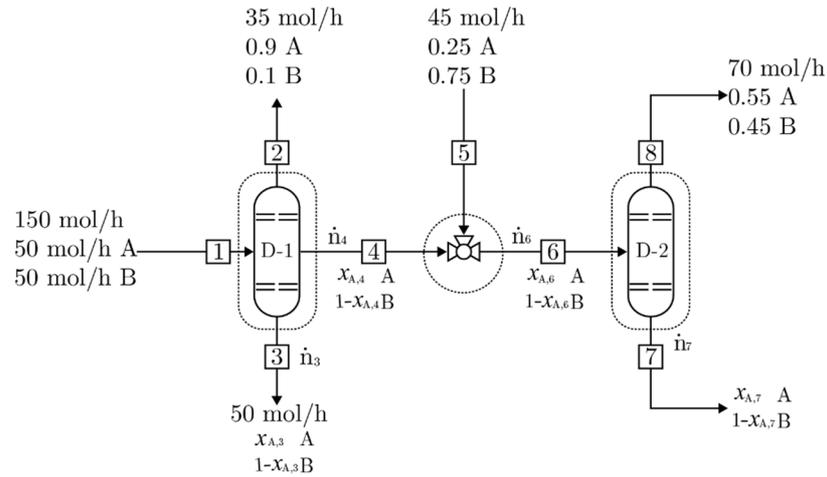


FIGURA DEL EJEMPLO 2.1.2

Esquema para análisis de grados de libertad

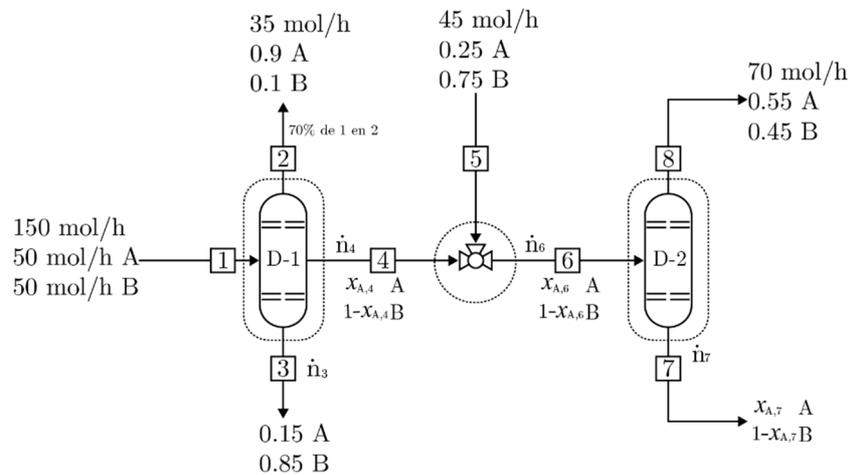


FIGURA DEL EJEMPLO 2.1.3

Esquema para análisis de grados de libertad

Solución

Para el primer diagrama de flujo:

Se divide al proceso en el sistema general y tres subsistemas: Proceso completo, destilador 1, destilador 2 y mezcla de corrientes.

Se realiza el análisis de grados de libertad colocando en una tabla el número de variables desconocidas, el número de ecuaciones independientes y el número de relaciones extras especificadas en el problema:

	Sistemas			
	Destilador	Destilador	Mezcla	Proceso general
	1	2		
Número de incógnitas	2	4	4	3
Número de ecuaciones independientes	2	2	2	2
Relaciones extras	0	0	0	0
GDL	0	2	2	1

El sistema con el que se va a empezar el balance de materia será con el destilador 1, en este subsistema el análisis de grados de libertad es igual a cero.

Para el segundo diagrama de flujo:

	Sistemas			
	Destilador	Destilador	Mezcla	Proceso general
	1	2		
Número de incógnitas	3	4	4	3
Número de ecuaciones independientes	2	2	2	2
Relaciones extras	0	0	0	0
GDL	1	2	2	1

El valor de los grados de libertad cambió con respecto al anterior, el diagrama está sub especificado para el destilador 1, es necesario información extra para la resolución del problema.

Para el tercer diagrama de flujo:

	Sistemas			
	Destilador	Destilador	Mezcla	Proceso general
	1	2		
Número de incógnitas	2	4	4	3
Número de ecuaciones independientes	2	2	2	2
Relaciones extras	1	0	0	0
GDL	-1	2	2	1

El valor de los grados de libertad cambió con respecto al anterior, el diagrama está sobre especificado para el destilador 1, el exceso de restricciones impide la resolución del problema.

2.3 Recirculación, baipás, purga y realimentación

En procesos industriales es muy común el uso de corrientes que no atraviesan las fronteras del sistema con el propósito de obtener un proceso más eficiente. Este propósito se logra al reciclar, purgar, desviar y realimentar corrientes en el sistema.

Estas corrientes son generalmente utilizadas en procesos reactivos para evitar la acumulación en reactores químicos, controlar la temperatura de un reactor, obtener la mayor cantidad de productos, y de esta manera mejorar la eficiencia del proceso.

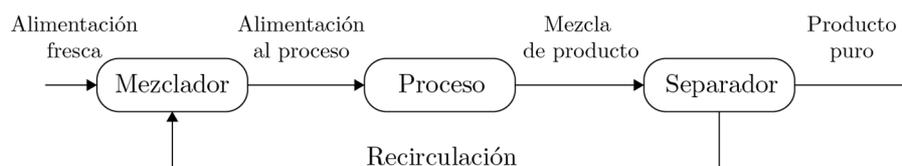


FIGURA 2.2

Esquema de corriente de recirculación en un proceso

2.3.1 Recirculación

Las corrientes de recirculación en los procesos químicos y petroquímicos son usadas para recuperar un catalizador, reutilizar reactivos que no reaccionaron en el reactor, mezclarse con otras corrientes del proceso, controlar las variables del proceso, entre otras.

Es importante elegir correctamente el sistema para realizar los balances de materia, porque a menudo una corriente de recirculación se mezclará con una corriente de alimentación fresca al proceso. Por lo tanto, en un proceso reactivo la cantidad de productos generados va a depender de la corriente de salida del mezclador, y no de la corriente de alimentación fresca.

En la figura 2.3, se muestra un diagrama de flujo de un proceso con una corriente de recirculación. Los componentes A y B entran a un reactor, en la corriente de salida del reactor se tiene el producto C incluida una cantidad de reactivos sobrantes de la reacción, el producto C es separado y los reactivos se recirculan al reactor después de mezclarse con la corriente de alimentación.

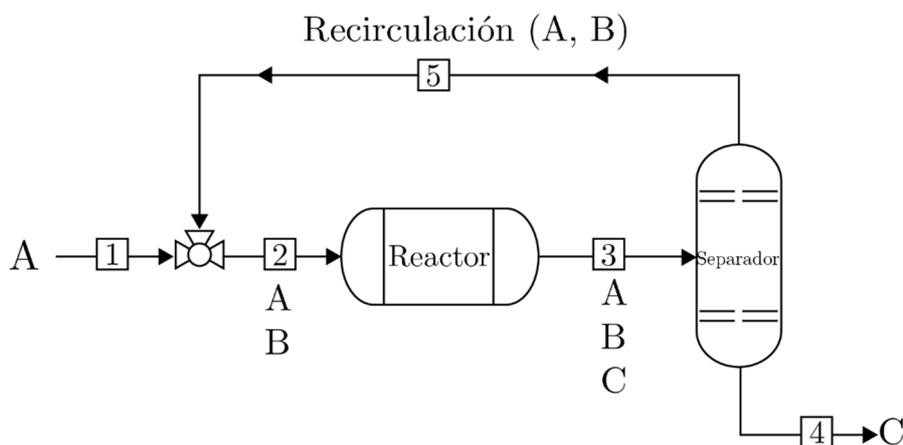


FIGURA 2.3

Corriente de recirculación en un reactor

2.3.2 Baipás

Se define como la fracción de una corriente de alimentación para una unidad de proceso, desviada y combinada con la corriente de salida de la misma unidad.

Generalmente se la utiliza en procesos reactivos para cambiar la composición de los productos de reacción química.

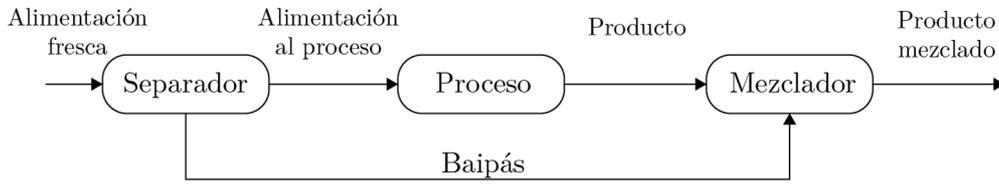


FIGURA 2.4

Esquema de corriente de bypass en un proceso

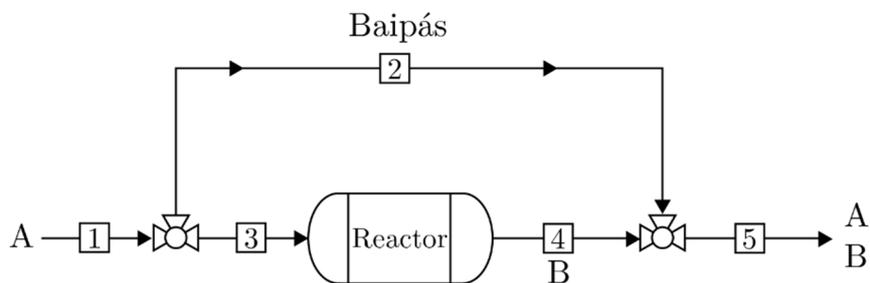


FIGURA 2.5

Corriente de bypass en un reactor

2.3.3 Purga

Se define como una pequeña fracción de la corriente de recirculación enviada fuera del proceso. Esta corriente evita que materiales no deseados se acumulen en el sistema. A menudo, en el balance de materia no se considera la corriente de purga como una salida del proceso, porque el caudal en la corriente de purga es insignificante con respecto al caudal de la corriente de recirculación.

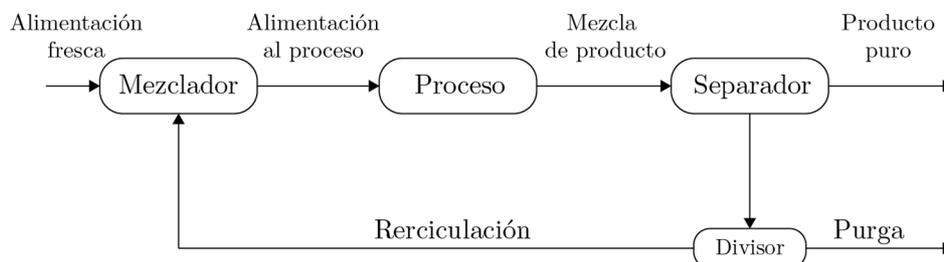


FIGURA 2.6

Esquema de corriente de purga en un proceso

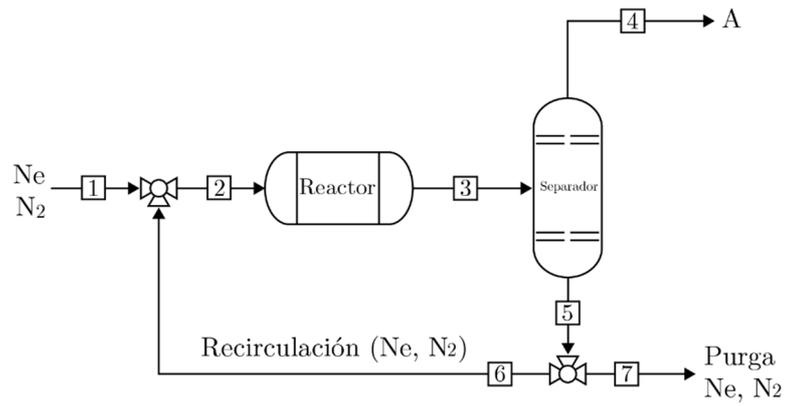


FIGURA 2.7

Corriente de purga en un reactor

2.3.4 Corriente de realimentación

Una corriente de realimentación es una reposición de caudal molar o másico a un proceso, para un funcionamiento correcto del mismo. En un proceso pueden perderse cantidades de componentes debido a fugas, arrastre en las separaciones y en la purga de corrientes de recirculación. En la figura 2.6 se muestra una corriente de proceso con una corriente de realimentación.

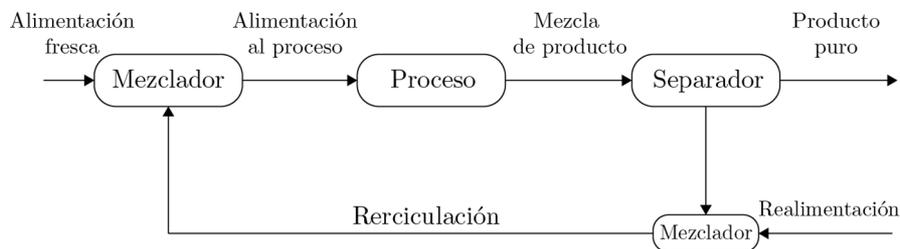


FIGURA 2.8

Esquema de corriente de realimentación a un proceso

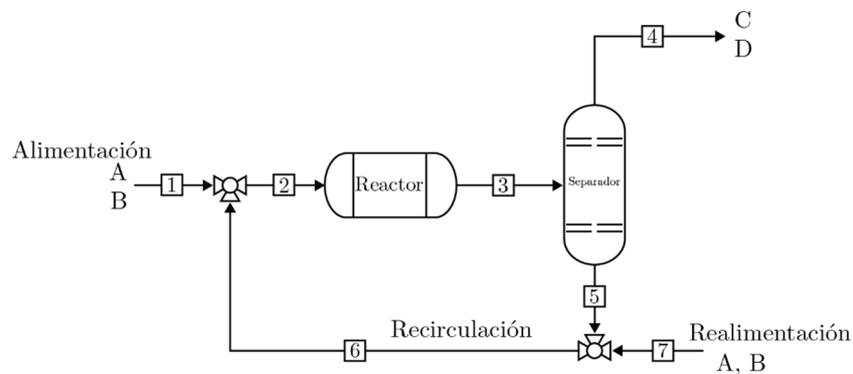


FIGURA 2.9

Corriente de realimentación en proceso reactivo

Ejemplo 2.2 Columnas de Destilación en Serie

La secuencia de separación directa es la más utilizada para separar componentes de una corriente de alimentación de composición 35% benceno, 45% tolueno y 20% de xileno. La corriente gaseosa del primer destilador presenta una composición de 92% de benceno, 6% tolueno y 2% de xileno. El segundo destilador se diseña para recuperar el 91% de tolueno de la alimentación fresca en la corriente superior de salida con una composición del 0.95. Los fondos contienen el 91.2% de xileno de la corriente de alimentación con una composición de 0.75. Calcule la composición en todas las corrientes del proceso.

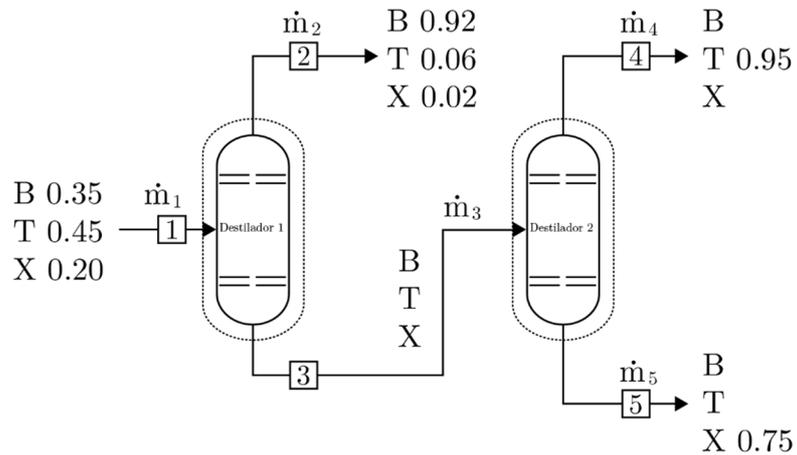


FIGURA DEL EJEMPLO 2.2.1

Esquema para análisis de grados de libertad

Solución

Se realiza el análisis de grados de libertad para determinar si el problema presenta solución con los datos proporcionados:

	Sistemas		
	Destilador	Destilador	Proceso
	1	2	general
Número de incógnitas	5	7	6
Número de ecuaciones independientes	3	3	3
Número de relaciones extras	0	1	2
GDL	2	4	1

En el análisis se puede observar que el grado de libertad más bajo es uno para el proceso general, se debe asumir una variable extra para la resolución del problema. En este proceso no se dan valores de caudales molares o másicos, por esta razón se asumirá 150 kg/h de alimentación fresca, lo que reducirá los grados de libertad del proceso general a cero. Balance general del proceso:

$$E=S$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5$$

Balance por componentes:

Para el benceno:

$$x_{B,1}\dot{m}_1 = x_{B,2}\dot{m}_2 + x_{B,4}\dot{m}_4 + x_{B,5}\dot{m}_5$$

$$(0.92)\dot{m}_2 + x_{B,4}\dot{m}_4 + x_{B,5}\dot{m}_5 = (0.35) \left(150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$$

Para el tolueno:

$$x_{T,1}\dot{m}_1 = x_{T,2}\dot{m}_2 + x_{T,4}\dot{m}_4 + x_{T,5}\dot{m}_5$$

$$1 = x_{B,5} + x_{T,5} + x_{X,5}$$

$$1 = x_{B,5} + 0.75 + x_{X,5}$$

$$(0.45) \left(150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 0.06\dot{m}_2 + 0.95\dot{m}_4 + (1 - x_{B,5} - 0.75)\dot{m}_5$$

Para el xileno:

$$x_{X,1}\dot{m}_1 = x_{X,2}\dot{m}_2 + x_{X,4}\dot{m}_4 + x_{X,5}\dot{m}_5$$

$$1 = x_{B,4} + x_{T,4} + x_{X,4}$$

$$1 = x_{B,4} + 0.91 + x_{X,4}$$

$$(0.2) \left(150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = (0.02)\dot{m}_2 + (1 - 0.91 - x_{B,4})\dot{m}_4 + (0.75)\dot{m}_5$$

Se diseña el segundo separador para recuperar el 91% de tolueno de la alimentación en la corriente superior de salida, entonces:

$$\dot{m}_{1T} = x_{T,1}\dot{m}_1 = (0.45) \left(150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 67.5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$0.91\dot{m}_{1T} = 0.95\dot{m}_4$$

$$0.91 \left(67.5 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 0.95\dot{m}_4$$

$$\dot{m}_4 = 64.658 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (\text{i})$$

En la corriente inferior, se aplica una relación similar a la utilizada en la corriente superior para el xileno, separando el 91.2% de la corriente de alimentación:

$$\dot{m}_{1X} = x_{X,1}\dot{m}_1 = (0.2) \left(150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 30 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$0.912\dot{m}_{1X} = 0.75\dot{m}_5$$

$$0.912 \left(30 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 0.75\dot{m}_5$$

$$\dot{m}_5 = 36.48 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (\text{ii})$$

Se sustituye (i) y (ii) en el balance general del proceso:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5$$

$$\dot{m}_2 = 150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 64.658 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 36.48 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_2 = 48.862 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (\text{iii})$$

Al remplazar (i), (ii) y (iii) en el balance por componente del tolueno:

$$(0.45) \left(150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 0.06\dot{m}_2 + 0.95\dot{m}_4 + (1 - x_{B,5} - 0.75)\dot{m}_5$$

$$(0.45) \left(150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 0.06 \left(48.862 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) + (0.95) \left(64.658 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \\ + (1 - x_{B,5} - 0.75) \left(36.48 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$$

$$x_{B,5} = 0.164$$

Al remplazar (i), (ii) y (iii) en el balance por componente del xileno:

$$(0.2) \left(150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = (0.02)\dot{m}_2 + (1 - 0.91 - x_{B,4})\dot{m}_4 + (0.75)\dot{m}_5$$

$$(0.2) \left(150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = (0.02) \left(48.862 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) + (1 - 0.91 - x_{B,4}) \left(64.658 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \\ + (0.75) \left(36.48 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$$

$$x_{B,4} = 0.111$$

Ejemplo 2.3 Proceso de Separación

Una corriente de alimentación que contiene 60% en peso de componente C y 40% en peso de componente D con un flujo másico de 80 kg/h entra a un separador, el cual cumple la función de eliminar una parte del componente C, enviándolo como producto puro en la corriente de fondo. La corriente de producto en la parte superior del separador contiene 15% en peso de componente C y el restante de componente D. Una parte de la corriente superior de producto del separador se recircula a mezclarse con la corriente de alimentación, una parte de la corriente de recirculación se purga. El separador se diseña para eliminar un tercio del componente C alimentado. Calcular las composiciones y flujos másicos de las corrientes.

Solución

Se realiza el diagrama de flujo del proceso descrito en el problema:

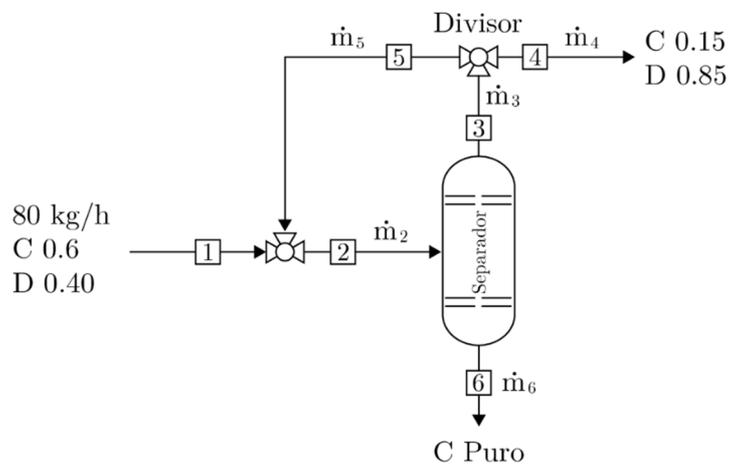


FIGURA DEL EJEMPLO 2.3.1

Diagrama de sistema de separación

Análisis de grados de libertad:

	Sistemas			
	Separador	Divisor	Mezcla	Proceso general
Número de incógnitas	3	4	3	2
Número de ecuaciones independientes	2	2	1	2
Número de relaciones extras	0	1	0	0
GDL	1	1	2	0

El análisis de grados de libertad en el proceso en general es cero. El primer sistema analizado será el proceso general.

Balance general de materia:

$$E = S$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_6 + \dot{m}_4$$

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_4 = 80 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (i)$$

Balance de materia por componentes:

Para C:

$$x_{C,1}\dot{m}_1 = x_{C,6}\dot{m}_6 + x_{C,6}\dot{m}_4$$

$$(0.6) \left(80 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \dot{m}_6 + 0.15\dot{m}_4 \quad (ii)$$

Se resuelven las ecuaciones (i) y (ii):

$$\dot{m}_6 = 80 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - \dot{m}_4$$

Al reemplazar \dot{m}_6 en la ecuación (ii):

$$(0.6) \left(80 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \dot{m}_6 + 0.15\dot{m}_4$$

$$(0.6) \left(80 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 80 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - \dot{m}_4 + 0.15\dot{m}_4$$

$$\dot{m}_4 = 37.647 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Se reemplaza \dot{m}_4 en la ecuación (i):

$$\dot{m}_6 = 80 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - \dot{m}_4$$

$$\dot{m}_6 = 80 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - \dot{m}_4$$

$$\dot{m}_6 = 80 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 37.647 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 42.353 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Balance específico en el separador:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_6$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 + 42.353 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Balance específico por componentes en el separador:

Para C:

$$x_{C,2}(\dot{m}_2) = x_{C,3}(\dot{m}_3) + x_{C,6}(\dot{m}_6)$$

$$x_{C,2}(\dot{m}_2) = \dot{m}_3(0.15) + 42.353 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

El separador remueve 1/3 de la corriente de alimentación en la corriente inferior de salida:

$$(x_{C,2} \times \dot{m}_2) \left(\frac{1}{3} \right) = x_{C,6}(\dot{m}_6)$$

$$x_{C,6}(\dot{m}_6) = 42.353 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$(x_{C,2} \times \dot{m}_2) \left(\frac{1}{3} \right) = 42.353 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$x_{C,2}(\dot{m}_2) = 127.059 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Se reemplaza el término $x_{C,2}(\dot{m}_2)$ en la ecuación de balance en el separador del componente C:

$$x_{C,2}(\dot{m}_2) = \dot{m}_3(0.15) + 42.353 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$127.059 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = \dot{m}_3(0.15) + 42.353 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_3 = 564.707 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

En la ecuación de balance de materia específico en el separador:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 + 42.353 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_2 = 564.707 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 42.353 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_2 = 607.06 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

La composición de C en la corriente dos será:

$$x_{C,2}(\dot{m}_2) = 127.059 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$x_{C,2} \left(607.06 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 127.059 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$x_{C,2} = 0.209$$

Balance específico en el divisor:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5$$

Sustituyendo \dot{m}_3 y \dot{m}_4 :

$$564.707 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 37.647 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + \dot{m}_5$$

$$\dot{m}_5 = 527.06 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Ejemplo 2.4 Proceso de absorción

A una corriente de alimentación que contiene 2.5 % en peso de CO, 7% de H₂S, 12% de CO₂, y el resto de CH₄, se le implementa un proceso de eliminación de azufre. El diseño del absorbedor establece un límite de caudal máximo de 100 kg/h. En la corriente principal de producto se tiene 1.5% de H₂S, 0.4% de CO, y el resto de metano y dióxido de carbono.

Este diseño de absorbedor solo absorbe monóxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. Con una alimentación fresca al proceso de 120 kg/h, encontrar los caudales máscicos de las corrientes que salen del proceso.

Solución

Se realiza el diagrama de flujo del proceso descrito en el problema:

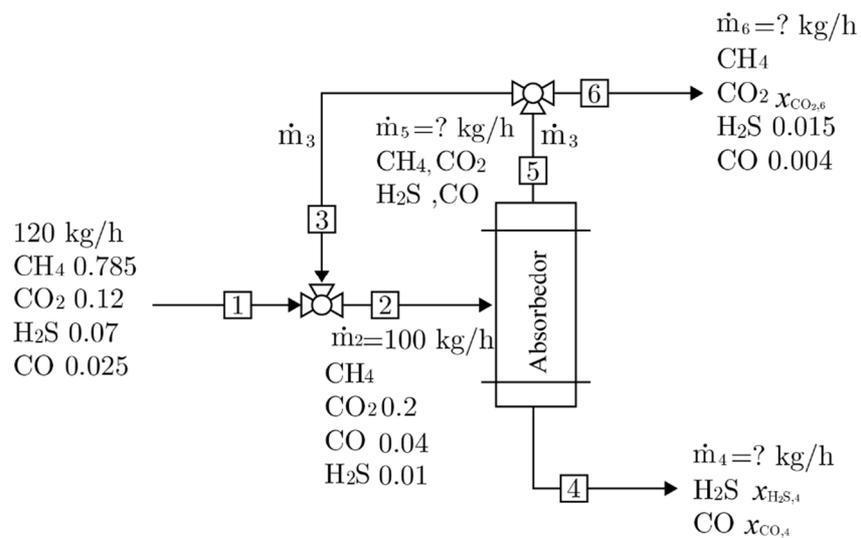


FIGURA DEL EJEMPLO 2.4.1

Diagrama de sistema de separación

Análisis de grados de libertad:

	Sistemas		
	Separador	Divisor	Proceso general
Número de incógnitas	6	6	4
Número de ecuaciones independientes	4	4	4
Número de relaciones extras	0	0	0
GDL	2	2	0

El análisis de grados de libertad en el proceso en general es cero. El primer sistema analizado será el proceso general.

Balance general de materia:

$$E = S$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_4 + \dot{m}_6$$

$$120 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = \dot{m}_4 + \dot{m}_6$$

Balance por componentes:

Para el CO_2 :

$$(x_{\text{CO}_2,1})\dot{m}_1 = (x_{\text{CO}_2,4})\dot{m}_4 + (x_{\text{CO}_2,6})\dot{m}_6$$

$$x_{\text{CO}_2,6} = 0$$

$$0.12(120) = (x_{\text{CO}_2,6})\dot{m}_6 + 0$$

Para el H_2S :

$$(x_{\text{H}_2\text{S},1})\dot{m}_1 = (x_{\text{H}_2\text{S},6})\dot{m}_6 + (x_{\text{H}_2\text{S},4})\dot{m}_4$$

$$(0.07)120 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = (0.015)\dot{m}_6 + (x_{\text{H}_2\text{S},4})\dot{m}_4 \quad (\text{i})$$

Para el CO:

$$(x_{\text{CO},1})\dot{m}_1 = (x_{\text{CO},6})\dot{m}_6 + (x_{\text{CO},4})\dot{m}_4$$

$$0.025(120) \frac{\text{kg}}{\text{h}} = (0.004)\dot{m}_6 + (x_{\text{CO},4})\dot{m}_4$$

Tomando en cuenta que la suma de las fracciones parciales en una corriente es igual a cero:

$$x_{\text{CO},4} + x_{\text{H}_2\text{S},4} = 1$$

$$x_{\text{CO},4} = 1 - x_{\text{H}_2\text{S},4}$$

Se sustituye $x_{\text{CO},4}$ en el balance de materia del CO:

$$0.025(120) \frac{\text{kg}}{\text{h}} = (0.004)\dot{m}_6 + (1 - x_{\text{H}_2\text{S},4})\dot{m}_4 \quad (\text{ii})$$

Sumando las ecuaciones (i) y (ii) se tiene:

$$(0.07)120 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = (0.015)\dot{m}_6 + (x_{\text{H}_2\text{S},4})\dot{m}_4$$

Se arregla la ecuación (ii):

$$0.025(120) \frac{\text{kg}}{\text{h}} = (0.004)\dot{m}_6 + \dot{m}_4 - (x_{\text{H}_2\text{S},4})\dot{m}_4$$

Se tiene:

$$11.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = (0.019)\dot{m}_6 + \dot{m}_4$$

$$11.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - (0.019)\dot{m}_6 = \dot{m}_4$$

Reemplazando \dot{m}_4 en el balance de general de materia:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_4 + \dot{m}_6$$

$$120 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = \dot{m}_4 + \dot{m}_6$$

$$120 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = \left(11.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - (0.019)\dot{m}_6 \right) + \dot{m}_6$$

$$108.6 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0.981\dot{m}_6$$

$$\dot{m}_6 = \frac{108.6}{0.981} = 110.73 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Se encuentra el valor de \dot{m}_4 :

$$11.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - (0.019)\dot{m}_6 = \dot{m}_4$$

$$11.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - (0.019)110.73 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = \dot{m}_4$$

$$\dot{m}_4 = 9.296 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Ejemplo 2.5 Evaporación-Cristalización

Una corriente con un caudal molar de 150 mol/h de composición 30% de KNO_3 en agua. Esta corriente se combina con una corriente de recirculación antes de entrar a un evaporador. La corriente líquida producto del evaporador contiene 40% de agua. En un cristalizador se obtendrán 92% en cristales de KNO_3 y 8% en agua. La corriente líquida del cristalizador se recircula al evaporador con 7 mol de KNO_3 por cada 10 mol de agua. Determinar las composiciones molares y caudales de las corrientes.

Solución

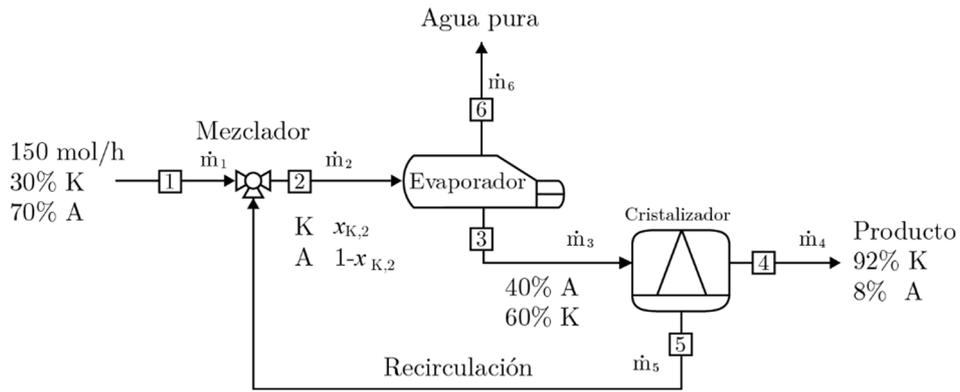


FIGURA DEL EJEMPLO 2.5.1

Proceso de evaporación-cristalización

Análisis de grados de libertad:

	Sistemas			Proceso general
	Mezclador	Evaporador	Cristalizador	
Número de incógnitas	4	4	3	2
Número de ecuaciones independientes	2	2	2	2
Número de relaciones extras	0	1	0	0
GDL	2	1	1	0

El análisis de grados de libertad en el proceso en general es cero. El primer sistema analizado será el proceso general.

La base de cálculo será: 150 mol/h.

Se tienen una relación en la corriente de recirculación que permitirá calcular la fracción molar de las componentes presentes, entonces:

$$x_i = \left(\frac{\text{moles } i \text{ en la corriente}}{\text{moles totales de la corriente}} \right)$$

$$x_{\text{KNO}_3,5} = \left(\frac{7 \text{ mol/h}}{7 \text{ mol/h} + 10 \text{ mol/h}} \right) = 0.412$$

Aplicando el concepto de fracciones parciales se calcula la fracción molar para el agua en la corriente de recirculación:

$$x_{\text{H}_2\text{O},5} + x_{\text{KNO}_3,5} = 1$$

$$x_{\text{H}_2\text{O},5} = 1 - 0.412 = 0.588$$

Balance general de materia:

$$\dot{n}_1 = \dot{n}_4 + \dot{n}_6$$

$$150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = \dot{n}_4 + \dot{n}_6$$

Balance por componentes:

Para el KNO_3 :

$$\dot{n}_1 = \dot{n}_4 + \dot{n}_6$$

$$(x_{\text{KNO}_3,1})\dot{n}_1 = (x_{\text{KNO}_3,4})\dot{n}_4 + (x_{\text{KNO}_3,6})\dot{n}_6$$

En la corriente seis sale únicamente agua:

$$(x_{\text{KNO}_3,1})\dot{n}_1 = (x_{\text{KNO}_3,4})\dot{n}_4$$

$$(x_{\text{KNO}_3,1})\dot{n}_1 = (0.3) \times 150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 45 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$45 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = (0.92)\dot{n}_4$$

$$\dot{n}_4 = 48.913 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

De la ecuación de balance general se obtiene el valor de la corriente seis:

$$150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = \dot{n}_4 + \dot{n}_6$$

$$150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 48.913 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + \dot{n}_6$$

$$\dot{n}_6 = 101.087 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Como se encontró el valor de \dot{n}_4 el análisis de grados de libertad en el cristalizador se redujo a cero:

Balance de materia específico:

Cristalizador:

$$\dot{n}_3 = \dot{n}_4 + \dot{n}_5$$

$$\dot{n}_3 = 48.913 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + \dot{n}_5 \quad (\text{i})$$

Balance por componentes en el cristalizador:

Para el KNO_3 :

$$(x_{\text{KNO}_3,3})\dot{n}_3 = (x_{\text{KNO}_3,4})\dot{n}_4 + (x_{\text{KNO}_3,5})\dot{n}_5$$

$$(0.6)\dot{n}_3 = (0.92) \left(48.913 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) + (0.412)\dot{n}_5 \quad (\text{ii})$$

Reemplazando (i) en (ii) se tendrá:

$$(0.6)\dot{n}_3 = (0.92) \left(48.913 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) + (0.412)\dot{n}_5$$

$$(0.6) \left(48.913 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + \dot{n}_5 \right) = (0.92) \left(48.913 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) + (0.412)\dot{n}_5 \quad (\text{ii})$$

Arreglando la ecuación para obtener \dot{n}_5 :

$$\dot{n}_5 = 83.701 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Sustituyendo \dot{n}_5 en (i):

$$\dot{n}_3 = 48.913 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + 83.701 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_3 = 142.614 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

En el Mezclador:

$$\dot{n}_2 = \dot{n}_1 + \dot{n}_5$$

$$\dot{n}_2 = 150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + 83.701 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 233.701 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Balance por componentes en el mezclador:

Para el KNO_3 :

$$(x_{\text{KNO}_3,2})\dot{n}_2 = (x_{\text{KNO}_3,1})\dot{n}_1 + (x_{\text{KNO}_3,5})\dot{n}_5$$

$$(x_{\text{KNO}_3,2}) \left(233.701 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) = (0.3) \left(150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) + (0.412) \left(83.701 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right)$$

$$x_{\text{KNO}_3,2} = 0.340$$

Para el agua:

$$x_{\text{H}_2\text{O},2} + x_{\text{KNO}_3,2} = 1$$

$$x_{\text{H}_2\text{O},2} = 1 - 0.34 = 0.66$$

Ejemplo 2.6 Separador de Dióxido de Carbono y Sulfuro de Hidrógeno

En unidades de procesos petroquímicos como los reactores, el nitrógeno se utiliza como reactivo inerte, al finalizar el proceso se necesita separar el nitrógeno para utilizarlo nuevamente en el proceso o almacenarlo para un uso diferente. El nitrógeno se puede separar utilizando una columna de absorción, y el disolvente puede ser recuperado implementado un sistema de separación adecuado al proceso.

Un sistema de absorción de nitrógeno con recuperación de solvente se muestra en la figura del ejemplo 2.6.1, se requiere eliminar sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono de una corriente que contiene 14% sulfuro de hidrógeno, 26% de dióxido de carbono y el resto de nitrógeno. Se utiliza un disolvente selectivo para absorber solo CO_2 y H_2S . El nitrógeno es insoluble en el disolvente, saldrá en la corriente de producto con una pureza del 98%, libre de sulfuro de hidrógeno. La corriente de disolvente sale del absorbedor en dirección a un evaporador, la corriente superior del evaporador contiene 19% de disolvente, 23% de la alimentación al proceso de CO_2 y 13% de la alimentación de H_2S . La corriente de fondo del separador flash se divide en una corriente que se alimenta al absorbedor y otra a un separador con 4% de dióxido de carbono. En el separador se obtiene disolvente puro, esta corriente se mezcla con la de reposición de disolvente para entrar al absorbedor. La corriente gaseosa del separador contiene 27% de disolvente. El flujo molar en la alimentación es de 150 mol/h. Calcular las composiciones de todas las corrientes.

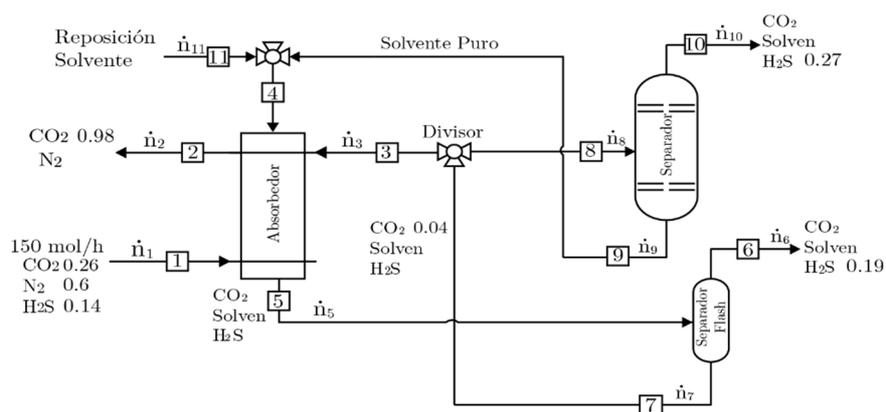


FIGURA DEL EJEMPLO 2.6.1

Recuperación de inerte

Solución

Análisis de grados de libertad:

	Sistema					Proceso general
	Separador flash	Separador	Absorbedor	Mezclador	Divisor	
Número de incógnitas	7	5	7	3	4	6
Número de ecuaciones independientes	3	3	4	1	1	4
Número de relaciones extras	0	0	0	0	1	2
GDL	4	2	3	2	2	0

En el análisis se puede observar que el grado de libertad más bajo es para el proceso general, se parte de la base de cálculo de 150 mol/h.

Balance de materia general:

$$E = S$$

$$\dot{n}_1 + \dot{n}_{11} = \dot{n}_2 + \dot{n}_6 + \dot{n}_{10}$$

$$150 = \dot{n}_2 + \dot{n}_6 + \dot{n}_{10} - \dot{n}_{11}$$

Las relaciones en el sistema son:

Relación de 23% de CO₂ de la alimentación fresca en la corriente de salida del separador flash:

$$0.23 \times (\dot{n}_{1\text{CO}_2}) = x_{\text{CO}_2,6} \times \dot{n}_6$$

$$\dot{n}_1(x_{\text{CO}_2,1}) = \dot{n}_{1\text{CO}_2}$$

$$\dot{n}_{1\text{CO}_2} = 0.26 \times 150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 39 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Sustituyendo $\dot{n}_{1\text{CO}_2}$:

$$0.23 \times \left(39 \frac{\text{mol}}{\text{h}}\right) = x_{\text{CO}_2,6} \dot{n}_6$$

$$x_{\text{CO}_2,6} \times \dot{n}_6 = 8.97 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Relación de 13% de H_2S de la alimentación fresca en la corriente de salida del separador flash:

$$0.13 \times (\dot{n}_{1\text{H}_2\text{S}}) = x_{\text{H}_2\text{S},6} \times \dot{n}_6$$

$$\dot{n}_1(x_{\text{H}_2\text{S},1}) = \dot{n}_{1\text{H}_2\text{S}}$$

$$\dot{n}_{1\text{H}_2\text{S}} = 0.14 \times 150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 21 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Sustituyendo $\dot{n}_{1\text{H}_2\text{S}}$:

$$0.13 \times \left(21 \frac{\text{mol}}{\text{h}}\right) = x_{\text{H}_2\text{S},6} \times \dot{n}_6$$

$$x_{\text{H}_2\text{S},6} \times \dot{n}_6 = 2.73 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Las fracciones molares deben sumar uno:

$$x_{\text{H}_2\text{S},6} + x_{\text{CO}_2,6} + x_{\text{solvente}} = 1$$

La corriente superior del evaporar contiene 19% de disolvente:

$$x_{\text{H}_2\text{S},6} + x_{\text{CO}_2,6} + 0.19 = 1$$

$$x_{\text{H}_2\text{S},6} = 1 - x_{\text{CO}_2,6} - 0.19$$

Sustituyendo $x_{\text{H}_2\text{S},6}$ en la relación:

$$x_{\text{H}_2\text{S},6} \times \dot{n}_6 = 2.73 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$(1 - x_{\text{CO}_2,6} - 0.19) \times \dot{n}_6 = 2.73 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Resolviendo las ecuaciones con las dos relaciones:

$$\left(1 - \frac{8.97 \frac{\text{mol}}{\text{h}}}{\dot{n}_6} - 0.19\right) \times \dot{n}_6 = 2.73 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$0.81\dot{n}_6 = 11.7 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_6 = 14.444 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

De las relaciones se obtienen los valores de $x_{\text{CO}_2,6}$ y $x_{\text{H}_2\text{S},6}$:

$$x_{\text{CO}_2,6} = 0.621 \quad , \quad x_{\text{H}_2\text{S},6} = 0.189$$

Balance de materia por componentes:

Para el CO_2 :

$$(x_{\text{CO}_2,1})\dot{n}_1 = (x_{\text{CO}_2,2})\dot{n}_2 + (x_{\text{CO}_2,10})\dot{n}_{10} + (x_{\text{CO}_2,6}) \dot{n}_6$$

$$(0.26)150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = (0.02)\dot{n}_2 + (x_{\text{CO}_2,10})\dot{n}_{10} + (x_{\text{CO}_2,6}) \dot{n}_6$$

$$39 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = (0.02)\dot{n}_2 + (x_{\text{CO}_2,10})\dot{n}_{10} + 14.444 \frac{\text{mol}}{\text{h}} (0.621)$$

$$30.03 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = (0.02)\dot{n}_2 + (x_{\text{CO}_2,10})\dot{n}_{10}$$

Para el H_2S :

$$(x_{\text{H}_2\text{S},1})\dot{n}_1 = (x_{\text{H}_2\text{S},2})\dot{n}_2 + (x_{\text{H}_2\text{S},10})\dot{n}_{10} + (x_{\text{H}_2\text{S},6}) \dot{n}_6$$

Si $x_{\text{H}_2\text{S},2} = 0$, $x_{\text{H}_2\text{S},10} = 1 - x_{\text{CO}_2,10} - 0.27$, $x_{\text{H}_2\text{S},6} = 1 - x_{\text{CO}_2,6} - 0.19$

$$(0.14) 150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 0 + (1 - x_{\text{CO}_2,10} - 0.27) \dot{n}_{10} + (1 - x_{\text{CO}_2,6} - 0.19) \dot{n}_6$$

Se sustituye el $x_{\text{CO}_2,6}$ y \dot{n}_6 :

$$21 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = (1 - x_{\text{CO}_2,10} - 0.27) \dot{n}_{10} + (1 - 0.621 - 0.19) \times 14.444$$

$$18.27 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = (0.73 - x_{\text{CO}_2,10}) \dot{n}_{10}$$

$$x_{\text{CO}_2,10} = 0.73 - \frac{18.27 \frac{\text{mol}}{\text{h}}}{\dot{n}_{10}}$$

Se reemplaza $x_{\text{CO}_2,10}$ en el balance para el CO_2 :

$$30.03 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = (0.02) \dot{n}_2 + 0.73 \dot{n}_{10} - 18.27 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$48.3 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = (0.02) \dot{n}_2 + 0.73 \dot{n}_{10}$$

$$\dot{n}_2 = 2415 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - 36.5 \dot{n}_{10}$$

Para el disolvente:

$$\dot{n}_{11} = 0.19 \dot{n}_6 + 0.27 \dot{n}_{10}$$

Para obtener el valor de \dot{n}_{10} se reemplaza \dot{n}_2 y \dot{n}_{11} en el balance materia general:

$$150 = 2415 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - 36.5 \dot{n}_{10} + \dot{n}_6 + \dot{n}_{10} - 0.19 \dot{n}_6 - 0.27 \dot{n}_{10}$$

Sustituyendo valores:

$$150 = 2415 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - 36.5 \dot{n}_{10} + 14.444 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + \dot{n}_{10} - 0.19 \left(14.444 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) - 0.27 \dot{n}_{10}$$

$$\dot{n}_{10} = 63.648 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Remplazando los valores calculados:

$$\dot{n}_{11} = 19.929 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_2 = 91.848 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$x_{\text{CO}_2,10} = 0.443$$

Balance de materia específico en el separador:

$$\dot{n}_8 = \dot{n}_9 + \dot{n}_{10}$$

$$\dot{n}_8 = \dot{n}_9 + 63.648 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Balance por componentes:

Para el CO_2 :

$$(x_{\text{CO}_2,8})\dot{n}_8 = (x_{\text{CO}_2,9})\dot{n}_9 + (x_{\text{CO}_2,10})\dot{n}_{10}$$

En la corriente 9 se encuentra el disolvente puro, y en la corriente 8 la fracción molar de CO_2 es 0.04:

$$x_{\text{CO}_2,9} = 0$$

$$(0.04)\dot{n}_8 = 0 + (0.443) \times 63.648 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_8 = 704.902 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

De la ecuación de balance de materia específico:

$$\dot{n}_9 = 641.254 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Para el disolvente:

$$(x_{\text{solvente},8})\dot{n}_8 = (x_{\text{solvente},10})\dot{n}_{10} + (x_{\text{solvente},9})\dot{n}_9$$

$$(x_{\text{solvente},8})704.902 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = (0.27) \left(63.648 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) + (1) \left(641.254 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right)$$

$$x_{s,8} = 0.934$$

Balance de materia específico en el divisor:

$$\dot{n}_7 = \dot{n}_8 + \dot{n}_3$$

La unidad es un divisor de corriente en partes iguales:

$$\dot{n}_8 = \dot{n}_3$$

$$\dot{n}_7 = 704.902 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + 704.902 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_7 = 1409.804 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Balance de materia específico en el separador flash:

$$\dot{n}_5 = \dot{n}_6 + \dot{n}_7$$

$$\dot{n}_5 = 14.444 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + 1409.804 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_5 = 1424.248 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Balance de materia específico en el separador flash:

$$\dot{n}_3 + \dot{n}_1 + \dot{n}_4 = \dot{n}_2 + \dot{n}_5$$

$$704.902 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + 150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + \dot{n}_4 = 91.848 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + 1424.248 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_4 = 661.194 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Ejemplo 2.7 Destilación de una Mezcla de BTX(Benceno-Tolueno-Xileno)

Los hidrocarburos aromáticos benceno, tolueno y xilenos tienen un uso generalizado en la industria petroquímica. Un uso importante es como precursores para químicos y polímeros de uso comercial como trinitrotolueno (TNT), nylon, entre otros productos.

Una mezcla de aromáticos (BTX) se alimentan a una columna de destilación con una composición 23% en moles de xileno, 44% en moles de tolueno y 33% de benceno con un caudal de 150 mol/h.

Se recupera 89% de xileno en la corriente de fondo de la torre de destilación obteniendo una composición de xileno 95% en moles y 5% de tolueno. La corriente superior se alimenta a una segunda torre de destilación. En esta torre de destilación se recupera 96% del benceno alimentado al proceso por la corriente superior con 3% en moles de tolueno. Calcular la composición de la corriente inferior de la segunda torre de destilación, y el porcentaje de recuperación del tolueno en la segunda columna de destilación.

Solución

Se dibuja el diagrama del proceso especificando todas las corrientes del sistema:

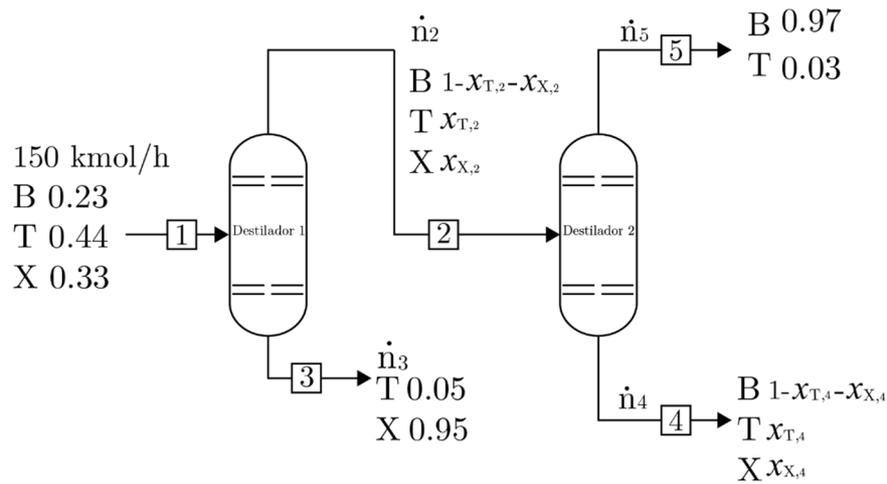


FIGURA DEL EJEMPLO 2.7.1

Destilador de mezcla BTX

El problema no requiere análisis de grados de libertad, es un sistema sobre especificado.

Se tiene una alimentación de 150 mol/h al sistema:

$$\dot{n}_1 = 150 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Balance de materia general:

$$E = S$$

$$\dot{n}_1 = \dot{n}_3 + \dot{n}_5 + \dot{n}_4$$

$$150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = \dot{n}_3 + \dot{n}_5 + \dot{n}_4$$

Balance de materia por componentes:

Para el xileno:

$$(x_{X,1})\dot{n}_1 = (x_{X,3})\dot{n}_3 + (x_{X,4})\dot{n}_4$$

Con la relación de 89% de xileno recuperado de la corriente de alimentación:

$$0.89(x_{X,1})\dot{n}_1 = (x_{X,3})\dot{n}_3$$

$$0.89 \times (0.23) \times 150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = (0.95)\dot{n}_3$$

$$\dot{n}_3 = 32.321 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Para el Benceno:

$$(x_{B,1})\dot{n}_1 = (x_{B,4})\dot{n}_4 + (x_{B,5})\dot{n}_5$$

Con la relación de 96% de xileno recuperado de la corriente de alimentación:

$$0.96(x_{B,1})\dot{n}_1 = (x_{B,5})\dot{n}_5$$

$$0.96 \times (0.33) \times 150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = (0.97)\dot{n}_5$$

$$\dot{n}_5 = 48.99 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Sustituyendo los valores en el balance de material general:

$$150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = \dot{n}_3 + \dot{n}_5 + \dot{n}_4$$

$$150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 32.321 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + 48.99 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + \dot{n}_4$$

$$\dot{n}_4 = 68.689 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Se sustituyen $\dot{n}_1, \dot{n}_3, \dot{n}_4$ en el balance por componente del xileno:

$$(x_{X,1})\dot{n}_1 = (x_{X,3})\dot{n}_3 + (x_{X,4})\dot{n}_4$$

$$(0.23) \times 150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = (0.95) \times 32.321 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + (x_{X,4}) \times 68.689 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$x_{X,4} = 0.055$$

Se sustituyen $\dot{n}_1, \dot{n}_4, \dot{n}_5$ en el balance por componente del benceno:

$$(x_{B,1})\dot{n}_1 = (x_{B,4})\dot{n}_4 + (x_{B,5})\dot{n}_5$$

$$(0.33) \times 150 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = (x_{B,4}) \times 68.689 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + (0.97) \times 48.99 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$x_{B,4}=0.029$$

El porcentaje de recuperación de tolueno de la corriente de alimentación en la segunda columna de destilación será:

$$x_{B,4}+x_{X,4}+x_{T,4}=1$$

$$x_{T,4}=1-x_{B,4}-x_{X,4}$$

$$x_{T,4}=1-0.029-0.055$$

$$x_{T,4}=0.916$$

Relación de recuperación:

$$(\text{recuperación})(x_{T,1})\dot{n}_1=(x_{T,4})\dot{n}_4$$

$$(\text{recuperación})=\frac{(x_{T,4})\dot{n}_4}{(x_{T,1})\dot{n}_1}$$

$$(\text{recuperación})=\frac{(0.916)\times 68.689\frac{\text{mol}}{\text{h}}}{(0.44)\times 150\frac{\text{mol}}{\text{h}}}$$

$$(\text{recuperación})=0.953$$

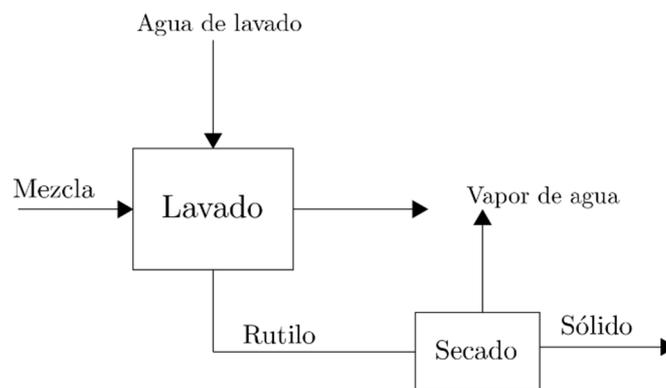
Ejercicios Propuestos

1. En una celda de ósmosis inversa se va a desalinizar 100 lb/h de agua de mar con un contenido de 4% en peso de sal. La corriente de residuo en la salida de la celda contiene salmuera y sal en 7% en peso, para recuperar toda el agua posible, la salmuera se recicla a un mezclador antes de entrar a la celda. La corriente de mezcla que entra a la celda tendrá un 5% en peso de sal. En la corriente de agua desalinizada se tiene 50 ppm de sal. Calcular:

- El caudal másico de salmuera en la corriente de desperdicio.
- El caudal másico de agua desalinizada.

2. Un método para obtener el pigmento de dióxido de titanio (TiO_2) es por medio del proceso de cloruro, el pigmento producido contiene una solución de

cloruro de sodio (sal diluida en agua). Para comercializar el pigmento es necesario que tenga un bajo contenido de sal. La mezcla de rutilo (TiO_2) y solución de cloruro de sodio con una composición de 35% en peso de rutilo, 20% de cloruro de sodio y el resto de agua, es alimentada a un decantador. En el decantador se obtienen dos corrientes, la corriente de interés contiene 70% de rutilo, mientras que la solución de lavado contiene 2% de rutilo sólido. El rutilo lavado se alimenta a una etapa de secado. Se diseña el proceso con el fin de obtener 2000 kg de sólido seco (mezcla de rutilo y sal). Calcular la cantidad de agua de lavado necesaria para producir el sólido deseado.



3. Se utilizan dos destiladores en serie para separar una mezcla de 15% N_2 , 45% CO y 40% O_2 . En la primera columna se separan nitrógeno y monóxido de carbono en el destilado, y en el fondo se tendrá N_2 , 25% de CO y 71% de O_2 . El caudal de fondo de la primera columna se dirigirá a la segunda columna. El producto de destilado de la segunda columna contiene 5% de N_2 , 80% de CO y 15% de O_2 ; el fondo solo contiene CO y O_2 . Calcular los caudales y las composiciones molares de todas las corrientes para un caudal de alimentación de 100 kmol/h.

4. Las aguas residuales de una fábrica de producción contienen 6% en peso de cromo. El flujo de residuos se envía a una planta de tratamiento, donde el 93% del cromo en la alimentación se elimina y se recicla a la instalación. La corriente líquida que sale del bloque de procesamiento se envía a una piscina de líquido

residual. La capacidad máxima de tratamiento del bloque de tratamiento es de 7300 kg de aguas residuales/h. Si el agua residual sale de la instalación más rápido que la capacidad del bloque, el exceso (cantidad mayor a 7300 kg/h) proveniente del agua residual se separa por una corriente de baipás para mezclarse con el líquido residual descargado del bloque, la corriente combinada ingresa a la piscina de residuos. Dibujar el diagrama de flujo del proceso y calcular todas las composiciones del proceso.

5. El agua de mar que contiene 4.3% en peso de cloruro de sodio pasa a través de una serie de 5 evaporadores. Cada evaporador cumple la misma función, es decir, evapora cantidades idénticas de agua. Las corrientes de agua evaporada se mezclan después de condensarse con el fin de obtener una corriente de agua pura. La corriente líquida de cada evaporador se envía al siguiente evaporador. La solución de cloruro de sodio en el último evaporador contiene 6% en peso de cloruro de sodio puro.

- a) Dibujar el diagrama de flujo del proceso y especificar las corrientes.
- b) Con una alimentación de 100 kg/h, calcular la composición de sal en la salida del segundo evaporador.

6. En una columna de adsorción se pretende separar 80% de CO_2 presente en una mezcla de gases de combustión. En el fondo de la columna se obtiene dióxido de carbono. En la corriente superior se tiene una composición de 92% de gases de combustión y el resto de CO_2 . Para separar de mejor manera el dióxido de carbono, una parte de la corriente superior de la columna se recircula para mezclarse con la alimentación fresca. Dibujar el diagrama de flujo y encontrar todas las cantidades desconocidas.

7. En un sistema se alimenta una corriente que contiene 35% en moles de C, 30% de D y 35% en moles de E. En la primera unidad se obtienen dos corrientes de producto; la corriente uno tiene una composición de 70% en moles de C y el

resto de D, y la corriente dos se alimenta a una unidad dos. En la unidad dos, la corriente inferior tiene una composición de 30% en moles de D, 60% de E y 10% de C, y su caudal molar es 150 mol/h. Encontrar los caudales molares de todas las corrientes.

8. El proceso de cristalización se utiliza para aumentar la concentración de una solución de nitrato de potasio (KNO_3) en agua, la solución con un 30% en KNO_3 entran a un evaporador con un caudal másico de 500 kg/h con el fin de eliminar parte de agua. La corriente de producto del evaporador con un 60% en KNO_3 entra a un cristalizador. En el cristalizador el KNO_3 se concentra hasta un 97%. La corriente secundaria del cristalizador es recirculada al evaporador. Se recirculan 0.5 kg de nitrato de potasio por kilogramo de agua. Calcular las composiciones de las corrientes.

9. Se requiere mezclar el agua con un compuesto sólido A para obtener una composición de 6% de A en agua. El agua que ingresa al mezclador se encuentra a alta presión, por lo tanto, se coloca un baipás para el agua antes del ingreso al mezclador. La corriente de producto del mezclador con un 15% en A se mezcla con el agua proveniente del baipás generando la composición deseada. Calcular el caudal másico de agua en la corriente de baipás.

10. Por medio de un proceso de evaporación se concentra el jugo fresco de durazno, el cual contiene un 85% de agua y fluye a 120 kg/h. Gran parte de la alimentación fresca se debe pasar por una corriente de baipás para poder alcanzar la evaporación máxima. En la corriente de salida del evaporador se une el corriente baipás. En el evaporador el agua es evaporada en un 95%. El producto concentrado tiene 15% en peso de agua. Calcular las corrientes que se producen y son evaporadas, además los caudales másicos y realizar el diagrama de flujo del proceso.

11. En un sistema de eliminación de azufre (S), la alimentación tiene un 18% en moles de CO_2 , 9% de H_2S y 73% de CH_4 . La columna de absorción permite un caudal máximo de 420 kmol/h, con un 3% de H_2S como corriente de producto, y lo que resta de CO_2 y CH_4 . En la corriente líquida únicamente se tendrá H_2S . Si el caudal en exceso pasa a una corriente de baipás y se mezcla con la corriente del producto, calcular la fracción molar del dióxido de carbono en la corriente de producto gaseoso.
12. Quinientos kilogramos de soja contienen 20% de aceites, 43% de proteínas, 11% de humedad y el 26% en carbohidratos, ceniza y fibra. Para producir la soja primero se tritura y luego se prensa reduciendo a 4% el contenido de aceite. El requerimiento de aceite en la harina es menor, por lo tanto, se utiliza un proceso de extracción con hexano para tener un 0.7% de aceite en la harina. Además, la harina es secada a 9% de humedad. Determinar la cantidad de agua perdida en el proceso, no se pierde agua en la extracción de aceite.
13. Jugo de naranja recién exprimido contiene aproximadamente 6% de sólidos totales, se requiere incrementar a 11% en peso de sólidos totales mediante el proceso de evaporación, inmediatamente se debe agregar azúcar para obtener 3% de azúcar en relación al jugo concentrado. Calcular la cantidad másica de azúcar que se debe agregar y la cantidad de agua que se debe eliminar. Se exprime 250 kg de jugo de naranja.

Referencias

Felder, R., & Rousseau, R. (2004). *3 Felder-Balance masa.pdf*. Limusa Wiley.

GARAVITO, N. G. (2009). *Balance De Materia*.

Ghasem, N., & Henda, R. (2014). *Principles of Chemical Engineering Processes: Material and Energy Balances* (Second). CRC Press.

<https://doi.org/10.1201/b17696>

Matar, S., & Hatch, L. F. (1994). *Chemistry of Petrochemical Processes*. Gulf Publishing.

Morris, A. E., Geiger, G., & Fine, H. A. (2011). *Handbook on Material and Energy Balance Calculations in Materials Processing*. Wiley.

Murphy, R. M. (2007). *Introducción a los Procesos Químicos: Principios, análisis y síntesis*. McGraw-Hill Interamericana.

3

Balance de Materia Con Reacción Química

Generalmente un reactor es la parte esencial en los procesos químicos y petroquímicos, por lo tanto, en el presente capítulo se estudiarán los conceptos relacionados con la estequiometría de las reacciones químicas aplicado a los balances de materia, definiendo a los componentes atómicos, especies moleculares y avance de reacción. Además, se describirán los balances de materia para reacciones de combustión.

Objetivos de Aprendizaje

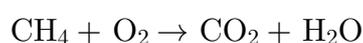
- Determinar las cantidades de componentes de una reacción, por medio de la estequiometría de una ecuación química balanceada.
- Comprender los enfoques utilizados para la resolución de balances de materia con reacción química para especies atómicas y moleculares.
- Utilizar el avance de reacción para la resolución de balances de ecuaciones en sistemas con reacciones químicas.
- Aplicar el análisis de grados de libertad en procesos con reacciones químicas.
- Analizar y escribir balances de materia en sistemas que presenten reacciones de combustión.

3.1 Estequiometría

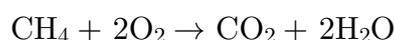
En la resolución de balances de materia en procesos reactivos es necesario considerar conceptos necesarios para la comprensión y aplicación de la estequiometría de una reacción química.

3.1.1 Ecuación Estequiométrica

Es la ecuación química que hace referencia al número de moles o moléculas de los reactivos o productos balanceados en una reacción química, es decir, el número de átomos de cada elemento o especie debe ser el mismo en cada lado de la ecuación. Por ejemplo, la siguiente reacción química



no es una ecuación química estequiométrica, porque el número de átomos de oxígeno e hidrógeno presentes en la reacción química no se encuentran balanceados. La ecuación química estequiométrica balanceada es la siguiente



En el capítulo uno sección 1.1, se define los coeficientes estequiométricos y las relaciones estequiométricas de una reacción química.

3.1.2 Reactivo Limitante y en Exceso

Dos reactivos se encuentran en proporciones estequiométricas, cuando la relación entre las moles de ambos reactivos es igual a la relación de los coeficientes estequiométricos de la reacción química. Si un reactivo se encuentra en menor cantidad a su proporción estequiométrica ante cualquier otro reactivo, este se considera limitante. En una reacción completa el reactivo limitante es el primero en consumirse, es decir que, al balancear la ecuación estequiométrica y calcular la relación entre la cantidad de reactivo alimentado y el correspondiente coeficiente estequiométrico, el menor valor obtenido en la relación se atribuirá al reactivo limitante.

$$\frac{\text{reactivo } i \text{ alimentado}}{\text{coeficiente estequiométrico del reactivo } i} = \frac{n_{i0}}{\gamma_i}$$

Un reactivo en exceso es aquel que no se agota completamente en el proceso cuando se tiene una reacción completa, determinándose mediante la relación entre la cantidad de reactivo en exceso en la alimentación y la cantidad estequiométrica requerida, por lo tanto

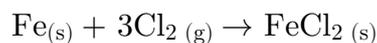
$$\text{Fracción en exceso de } i = \frac{n_{i0} - n_{i \text{ estequio}}}{n_{i \text{ estequio}}}$$

donde (n_{i0}) es la cantidad inicial de reactivo i en un reactor y ($n_{i \text{ estequio}}$) es el requerimiento estequiométrico de reactivo i para lograr una reacción completa.

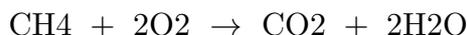
Ejemplo 3.1 Reactivo Limitante y en Exceso

Para los siguientes enunciados encuentre el reactivo limitante, en exceso y la fracción en exceso:

- 1 mol de hierro (Fe) reacciona con 2 mol de cloro para formar cloruro férrico (FeCl_3) por medio de la reacción:

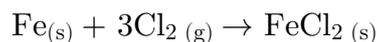


- 50 kg de metano reaccionan con 50 kg de oxígeno para formar dióxido de carbono y agua:



Solución

1. Se calcula la relación entre la alimentación y los coeficientes de la reacción:



$$\frac{\text{reactivo } i \text{ alimentado}}{\text{coeficiente estequiométrico del reactivo } i} = \frac{n_{i0}}{\gamma_i}$$

Para el hierro:

$$\frac{n_{\text{Feo}}}{\gamma_{\text{Fe}}} = \frac{1}{1}$$

Para el cloro:

$$\frac{n_{\text{Cl}_2\text{o}}}{\gamma_{\text{Cl}_2}} = \frac{2}{3} = 0.66$$

El reactivo limitante será el cloro porque la relación es menor que la del hierro. El hierro será el reactivo en exceso.

La fracción en exceso de hierro se calculará a partir de:

$$\text{Fracción en exceso de Fe} = \frac{n_{\text{Feo}} - n_{\text{Fe estequio}}}{n_{\text{Fe estequio}}}$$

$$n_{\text{Fe estequio}} = 2 \text{ mol Cl}_2 \times \frac{1 \text{ mol Fe}}{3 \text{ mol Cl}_2} = 0.667 \text{ mol Fe}$$

$$\text{Fracción en exceso de Fe} = \frac{1 \text{ mol Fe} - 0.667 \text{ mol Fe}}{0.667 \text{ mol Fe}} = 0.499$$

2. Es necesario convertir la masa a moles para encontrar relaciones en reacciones químicas. El peso molecular de metano es 14 kg/kmol, oxígeno 32 kg/kmol:

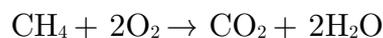
CH₄:

$$50 \text{ kg} \times \frac{1 \text{ kmol}}{14 \text{ kg}} = 3.571 \text{ kmol}$$

O₂:

$$50 \text{ kg} \times \frac{1 \text{ kmol}}{32 \text{ kg}} = 1.563 \text{ kmol}$$

Se calcula la relación entre la alimentación y los coeficientes de la reacción:



$$\frac{n_{i0}}{Y_i}$$

Para el metano:

$$\frac{n_{\text{CH}_4 0}}{Y_{\text{CH}_4}} = \frac{3.571}{1}$$

Para el oxígeno:

$$\frac{n_{\text{O}_2 0}}{Y_{\text{O}_2}} = \frac{1.563}{2} = 0.782$$

El reactivo limitante será el oxígeno porque la relación es menor que la del metano.

El metano será el reactivo en exceso.

La fracción en exceso de metano se calculará a partir de

$$\text{Fracción en exceso de CH}_4 = \frac{n_{\text{CH}_4 0} - n_{\text{CH}_4 \text{ estequio}}}{n_{\text{CH}_4 \text{ estequio}}}$$

$$n_{\text{CH}_4 \text{ estequio}} = 1.563 \text{ mol O}_2 \times \frac{1 \text{ mol CH}_4}{2 \text{ mol O}_2} = 0.782 \text{ mol CH}_4$$

$$\text{Fracción en exceso de CH}_4 = \frac{1.563 \text{ mol} - 0.782 \text{ mol}}{0.782 \text{ mol}} = 0.999$$

3.1.3 Conversión fraccionaria

En una reacción química los reactivos no se convierten en productos inmediatamente, la conversión completa depende del tiempo y ciertas condiciones que proporcione el reactor químico. Por lo tanto, un reactor no se puede diseñar para una reacción lenta en la que se consuma todo el reactivo limitante, esto ocasionará el consumo excesivo de energía. La conversión fraccionaria de un reactivo se obtiene por la relación entre las moles que reaccionan y las moles que se alimentan al reactor:

$$f = \frac{\text{moles reaccionadas}}{\text{moles alimentadas}}$$

$$f_i = \frac{n_{i_{\text{entrada}}} - n_{i_{\text{salida}}}}{n_{i_{\text{entrada}}}}$$

La fracción de conversión (f) se calcula para el reactivo limitante si no se especifica ningún componente de la reacción:

$$f_{rl} = \frac{n_{rl_{\text{entrada}}} - n_{rl_{\text{salida}}}}{n_{rl_{\text{entrada}}}}$$

donde (n_{rl}) son las moles del reactivo limitante.

3.2 Balances de Materia con Reacción Química

Para el planteamiento de las ecuaciones de balance de materia con reacciones químicas, es posible utilizar algunos métodos, como el de avance de reacción, de especies atómicas y de especies moleculares, escoger un enfoque correcto facilitará la resolución de los cálculos. En sistemas que involucren una sola reacción química es conveniente utilizar los balances por especies moleculares, en cambio para sistemas en los que se tengan múltiples reacciones se utilizan balances por especies atómicas; en tanto que el balance por avance de reacción se lo puede utilizar en forma general para cualquier proceso reactivo.

3.2.1 Balance de Materia General

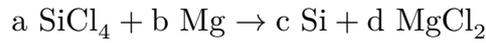
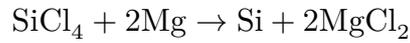
Como se revisó en la sección 1.3 del capítulo 1 referente a los balances de materia diferencial e integral de materia. En esta sección se detallará los tipos de ecuaciones de balance de materia con reacción química.

Una forma simple del balance general de materia es:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo}$$

En procesos reactivos en estado estacionario únicamente el término de acumulación será igual a cero.

Los términos de generación y consumo pueden establecerse mediante relaciones entre reactivos y productos de una reacción química. Esta relación se definió en la sección 1.1 del capítulo 1. Por ejemplo, se tiene la siguiente reacción:



La ecuación general de balance de materia en estado estacionario será:

$$0 = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo}$$

Las relaciones entre los reactivos y productos con los coeficientes estequiométricos de la reacción son:

$$\frac{\text{SiCl}_4 \text{ consumido}}{\text{Mg}_{\text{consumido}}} = \frac{\gamma_{\text{SiCl}_4}}{\gamma_{\text{Mg}}} = \frac{a}{b} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{\text{Si}_{\text{generado}}}{\text{Mg}_{\text{consumido}}} = -\frac{\gamma_{\text{Si}}}{\gamma_{\text{Mg}}} = \frac{c}{b} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{\text{MgCl}_2 \text{ generado}}{\text{Mg}_{\text{consumido}}} = -\frac{\gamma_{\text{MgCl}_2}}{\gamma_{\text{Mg}}} = \frac{d}{b} = \frac{2}{2}$$

Asumiendo que el Mg es el reactivo limitante, el balance de materia por componente será:

Para el magnesio que se consume:

$$n_{\text{Mg}_o} - n_{\text{Mg}} - \text{Mg}_{\text{consumido}} = 0$$

Para el SiCl₄ consumido:

$$n_{\text{SiCl}_{4o}} - n_{\text{Mg}} - \text{SiCl}_4 \text{ consumido} = 0$$

De la relación entre moles consumidas de SiCl₄ y moles consumidas de Mg:

$$n_{\text{SiCl}_{4\text{o}}} - n_{\text{Mg}} - 2 \text{Mg}_{\text{consumido}} = 0$$

Para el silicio puro:

$$n_{\text{SiO}} - n_{\text{Si}} - \text{Si}_{\text{generado}} = 0$$

De la relación se tiene:

$$n_{\text{SiO}} - n_{\text{Si}} - 2 \text{Mg}_{\text{consumido}} = 0$$

Para el MgCl_2 :

$$n_{\text{MgCl}_{2\text{o}}} - n_{\text{MgCl}_2} - \text{MgCl}_2_{\text{generado}} = 0$$

De la relación:

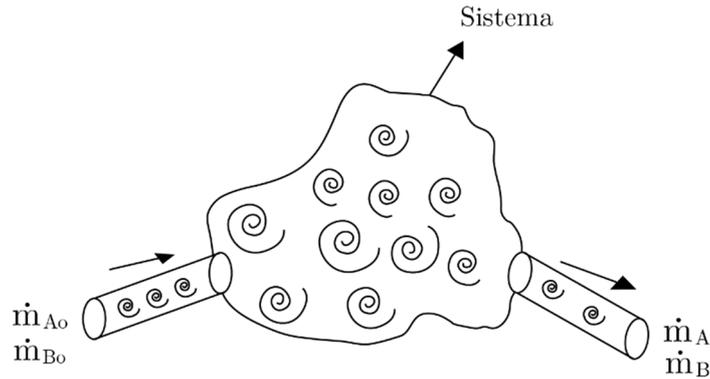
$$n_{\text{MgCl}_{2\text{o}}} - n_{\text{MgCl}_2} - \text{Mg}_{\text{consumido}} = 0$$

En esta sección se explicó la forma general del balance de materia con reacción química. Las ecuaciones de balance diferencial e integral de materia para procesos reactivos se indican a continuación.

3.2.1.1 Ecuación Diferencial de Balance de Materia

Un balance de materia en forma de ecuación diferencial representa un instante dado en el tiempo, es decir, la cantidad/tiempo. Esta ecuación se representa de la siguiente manera:

$$\frac{dm_{\text{sistema}}}{dt} = \dot{m}_o - \dot{m}$$

**FIGURA 3.1**

Sistema con corrientes de entrada y salida

Suponiendo que los especies A y B entran a un sistema y en la salida son cantidades diferentes, como se muestra en la figura 3.1:

$$\dot{m}_o = \dot{m}_{Ao} + \dot{m}_{Bo}$$

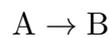
$$\dot{m} = \dot{m}_A + \dot{m}_B$$

$$m_{\text{sistema}} = m_{A \text{ sistema}} + m_{B \text{ sistema}}$$

Sustituyendo \dot{m}_o , \dot{m} y m_{sistema} en la ecuación diferencial:

$$\frac{d(m_{A \text{ sistema}} + m_{B \text{ sistema}})}{dt} = \dot{m}_{Ao} + \dot{m}_{Bo} - \dot{m}_A - \dot{m}_B \quad (3.1)$$

Se supone una reacción química entre los compuestos A y B:



En la reacción química se tienen velocidades de reacción másicas (\dot{R}_i) o molares (\dot{r}_i) de cada compuesto, y su signo dependerá de si la especie es consumida o generada, para la reacción anterior se tendrá:

$$\dot{R}_A = -\dot{R}_B$$

$$\dot{R}_A + \dot{R}_B = 0$$

Sumando la ecuación (3.1) con la ecuación de velocidad de reacción másica se tiene:

$$\frac{d(m_{A \text{ sistema}} + m_{B \text{ sistema}})}{dt} = \dot{m}_{Ao} + \dot{m}_{Bo} - \dot{m}_A - \dot{m}_B + \dot{R}_A + \dot{R}_B \quad (3.2)$$

La ecuación (3.2) dividida en dos ecuaciones, una para cada componente:

$$\frac{d(m_{A \text{ sistema}})}{dt} = \dot{m}_{A_o} - \dot{m}_A + \dot{R}_A$$

$$\frac{d(m_{B \text{ sistema}})}{dt} = \dot{m}_{B_o} - \dot{m}_B + \dot{R}_B$$

Para relacionar la velocidad de reacción másica con la velocidad de reacción molar se utiliza el peso molecular (PM):

$$\dot{R}_A = PM_A(\dot{r}_A)$$

$$\dot{R}_B = PM_B(\dot{r}_B)$$

Las velocidades de reacción molar se pueden relacionar mediante la estequiometría de la reacción química:

$$\frac{\dot{r}_A}{\dot{r}_B} = \frac{\gamma_A}{\gamma_B}$$

Para la reacción anterior:

$$\frac{\dot{r}_A}{\dot{r}_B} = -\frac{1}{1}$$

Entonces,

$$\frac{\dot{r}_A}{\gamma_A} = \frac{\dot{r}_B}{\gamma_B} = \dot{\xi}$$

Mediante las expresiones definidas se pueden encontrar alternativas para la ecuación (3.2):

Para la ecuación diferencial de balance de materia con reacción en términos de caudal másico:

$$\frac{d(m_{A \text{ sistema}})}{dt} = \dot{m}_{A_o} - \dot{m}_A + PM_A \gamma_A \dot{\xi}$$

$$\frac{d(m_{B \text{ sistema}})}{dt} = \dot{m}_{B_o} - \dot{m}_B + PM_B \gamma_B \dot{\xi}$$

Para la ecuación diferencial de balance de materia con reacción en términos de caudal molar:

$$\frac{d(n_{A \text{ sistema}})}{dt} = \dot{n}_{A_o} - \dot{n}_A + \gamma_A \dot{\xi}$$

$$\frac{d(n_{B \text{ sistema}})}{dt} = \dot{n}_{B_o} - \dot{n}_B + \gamma_B \dot{\xi}$$

Sumando las dos últimas ecuaciones, y en términos de moles totales, se obtiene:

$$\frac{dn_{\text{sistema}}}{dt} = \dot{n}_o - \dot{n} + (\gamma_A + \gamma_B)\dot{\xi}$$

En un sistema en estado estacionario no existe acumulación en el sistema, por lo tanto:

$$0 = \dot{n}_o - \dot{n} + (\gamma_A + \gamma_B)\dot{\xi}$$

3.2.1.2 Ecuación Integral de Balance de Materia

La ecuación integral de balance de materia considera al sistema sobre un tiempo infinito, es decir, las variables no van a cambiar en el tiempo. La ecuación integral de balance de materia con reacción química se define como:

$$\begin{aligned} n_{\text{sistema},f} - n_{\text{sistema},o} &= \sum_{\text{entrada de } j} \int_{t_o}^{t_f} \dot{n}_j dt - \sum_{\text{salida de } j} \int_{t_o}^{t_f} \dot{n}_j dt \\ &+ \sum_{\text{reacciones } k} \sum_{\text{salida de } j} \int_{t_o}^{t_f} \dot{r}_{jk} dt \end{aligned}$$

donde (\dot{n}_j) moles del componente, (t_f) tiempo final, (t_o) tiempo inicial, $(n_{\text{sistema},f})$ moles finales en el sistema, $(n_{\text{sistema},o})$ moles iniciales en el sistema, (\dot{r}_k) la velocidad de reacción molar del componente j en la reacción k .

3.3 Avance de Reacción con una Reacción Química

Al avance de reacción (ξ) se lo define como la velocidad de reacción de una especie dividida para el coeficiente estequiométrico de dicha sustancia. Este término establece una relación entre todos los componentes (reactivos y productos) presentes en una reacción química. Por lo tanto, el avance de reacción simplifica la resolución de las ecuaciones de balances de materia. Las unidades del avance de reacción están en mol/tiempo.

El balance de materia con una reacción química en estado estacionario es:

$$\dot{n}_i = \dot{n}_{i,o} + \gamma_i \dot{\xi}$$

donde (\dot{n}_{i_o}) es el flujo molar de entrada y (\dot{n}_i) es el flujo molar del componente i de salida.

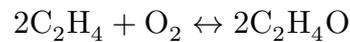
Ecuación de balance de materia para un sistema por lotes:

$$n_i = n_{i_o} + \gamma_i \xi$$

donde (n_{i_o}) es la cantidad molar inicial del componente i y (n_i) es la cantidad molar en la salida.

Ejemplo 3.2 Óxido de Etileno

Considere la siguiente reacción para la producción de óxido de etileno:



Una alimentación entra a un reactor con 2 moles de oxígeno, 3 moles de etileno y 1 mol de óxido de etileno. Realizar el diagrama de flujo del proceso con las corrientes nombradas. Desarrollar las ecuaciones de balance de materia con el término de avance de reacción.

Solución

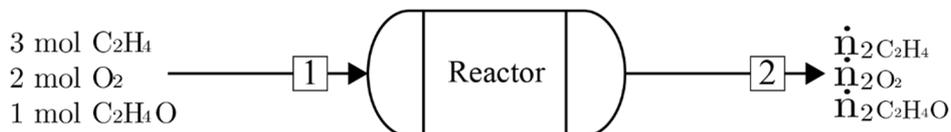


FIGURA DEL EJEMPLO 3.2.1

Óxido de etileno

La ecuación de balance de materia con el grado de reacción es:

$$\dot{n}_i = \dot{n}_{i_o} + \gamma_i \dot{\xi}$$

Balance de materia por componentes:

Para el C_2H_4 :

$$n_{C_2H_4} = n_{C_2H_4_o} - 2\xi$$

$$n_{C_2H_4} = 3 - 2\xi$$

Para el O_2 :

$$n_{O_2} = n_{O_{2o}} - \xi$$

$$n_{O_2} = 2 - \xi$$

Para el C_2H_4O :

$$n_{C_2H_4O} = n_{C_2H_4Oo} + 2\xi$$

$$n_{C_2H_4O} = 1 + 2\xi$$

Balance de materia en la corriente de entrada:

$$n_1 = n_{C_2H_4o} + n_{O_{2o}} + n_{C_2H_4Oo}$$

$$n_1 = 3 \text{ mol} + 2 \text{ mol} + 1 \text{ mol} = 6 \text{ mol}$$

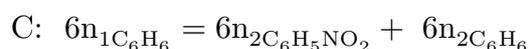
$$n_2 = n_1 - \xi$$

$$n_2 = 6 \text{ mol} - \xi$$

3.4 Método de Balance de Materia Atómico

En una reacción química el número de átomos de los elemento no cambian, por lo tanto, en la ecuación de balance de materia por especies atómicas se eliminarán los términos de generación y consumo. El balance de materia se reducirá a entrada es igual a salida para procesos en estado estacionario. Este método se basa en el número de moles del elemento presente en una molécula sea reactivo o producto. Para obtener la cantidad de moles del átomo se multiplica el número de átomos del elemento presente en la molécula por la cantidad de moles de la misma. Por ejemplo, en la sustitución electrofílica de benceno con ácido nítrico para obtener nitrobeneno, existen 6 átomos de carbono por cada mol de benceno.

El balance por especies atómicas se expresa como



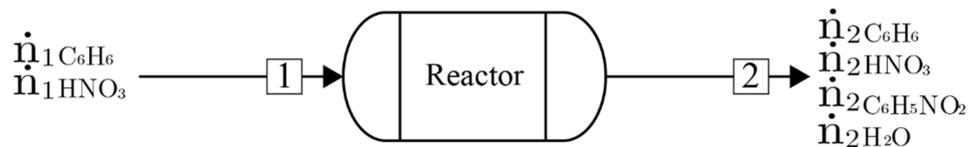
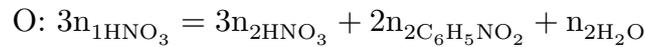


FIGURA 3.2

Producción de nitrobeneno

3.5 Método de Balance de Materia por Componentes Moleculares

Cuando se establecen las ecuaciones por componentes moleculares es necesario conservar los términos de generación y consumo, porque en una reacción química se obtienen moléculas como productos a partir de reactivos químicos. Por lo tanto, la ecuación de balance de materia en estado estacionario para este enfoque se convierte en

$$n_{\text{acumulación}} = \sum n_{\text{entrada}} - \sum n_{\text{salida}} + n_{\text{generado}} - n_{\text{consumido}}$$

$$0 = \sum \dot{n}_{\text{entrada}} - \sum \dot{n}_{\text{salida}} + \dot{n}_{\text{generado}} - \dot{n}_{\text{consumido}}$$

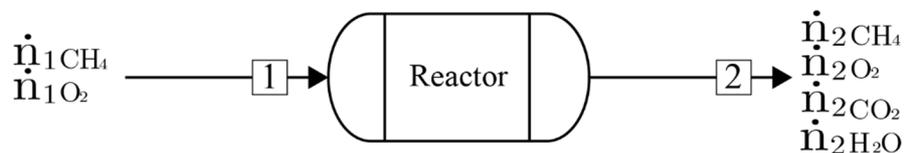


FIGURA 3.3

Combustión de metano

En la figura 3.3 se muestra el proceso de combustión del metano $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$, si se supone que se consumen 3 mol de metano, por medio de la

estequiometría de la reacción química, la cantidad de moles de dióxido de carbono obtenidas son

$$3 \text{ mol CH}_4 \frac{\text{consumidas}}{\text{consumidas}} \times \frac{1 \text{ mol CO}_2}{1 \text{ mol CH}_4} = 3 \text{ mol CO}_2 \text{ generadas}$$

Empleando el balance de materia por componentes moleculares, la cantidad en moles de CO₂ a la salida del proceso son

$$0 = \sum \dot{n}_{\text{entrada}} - \sum \dot{n}_{\text{salida}} + \dot{n}_{\text{generado}} - \dot{n}_{\text{consumido}}$$

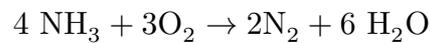
$$\sum \dot{n}_{\text{salida}} = \sum \dot{n}_{\text{entrada}} + \dot{n}_{\text{generado}} - \dot{n}_{\text{consumido}}$$

En la corriente de entrada al reactor no entra dióxido de carbono, entonces

$$n_{\text{CO}_2} = 0 + 3 \text{ mol} - 0 = 3 \text{ mol}$$

Ejemplo 3.3 Aplicación de Conceptos

De la siguiente reacción que forma nitrógeno puro:



Teniendo una alimentación de 6 mol/h de amoníaco y 6 mol/h de oxígeno, con una conversión fraccional de 0.6 para el oxígeno. Determinar los flujos molares en la salida utilizando los tres métodos de balance materia.

Solución

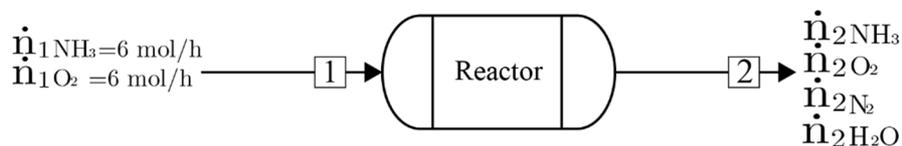


FIGURA DEL EJEMPLO 3.3.1

Obtención nitrógeno

1. Avance de reacción

Usando el balance de materia en un reactor con el avance de reacción:

$$\dot{n}_i = \dot{n}_{i0} + \gamma \dot{\xi}$$

Los coeficientes estequiométricos de cada especie son:

$$\gamma_{\text{NH}_3} = -4, \gamma_{\text{O}_2} = -3, \gamma_{\text{N}_2} = 2, \gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 6$$

Balance de materia por componente:

Para el NH_3 :

$$\dot{n}_{2\text{NH}_3} = \dot{n}_{1\text{NH}_3} - 4\dot{\xi}$$

Para el O_2 :

$$\dot{n}_{2\text{O}_2} = \dot{n}_{1\text{O}_2} - 3\dot{\xi}$$

Para el N_2 :

$$\dot{n}_{2\text{N}_2} = \dot{n}_{1\text{N}_2} + 2\dot{\xi}$$

Para el H_2O :

$$\dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}} = \dot{n}_{1\text{H}_2\text{O}} + 6\dot{\xi}$$

Balance de materia general en el reactor:

$$\dot{n}_2 = \dot{n}_1 + \gamma \dot{\xi}$$

$$\dot{n}_2 = \dot{n}_1 + (\gamma_{\text{NH}_3} + \gamma_{\text{O}_2} + \gamma_{\text{N}_2} + \gamma_{\text{H}_2\text{O}})\dot{\xi}$$

Todos los flujos molares alimentados son:

$$\dot{n}_1 = \dot{n}_{1\text{NH}_3} + \dot{n}_{1\text{O}_2} + \dot{n}_{1\text{N}_2} + \dot{n}_{1\text{H}_2\text{O}}$$

Entonces,

$$\dot{n}_2 = \dot{n}_{1\text{NH}_3} + \dot{n}_{1\text{O}_2} + \dot{n}_{1\text{N}_2} + \dot{n}_{1\text{H}_2\text{O}} + (\gamma_{\text{NH}_3} + \gamma_{\text{O}_2} + \gamma_{\text{N}_2} + \gamma_{\text{H}_2\text{O}})\dot{\xi}$$

$$\dot{n}_2 = \dot{n}_{1\text{NH}_3} + \dot{n}_{1\text{O}_2} + \dot{n}_{1\text{N}_2} + \dot{n}_{1\text{H}_2\text{O}} + (-4 - 3 + 2 + 6)\dot{\xi}$$

$$\dot{n}_2 = \dot{n}_{1\text{NH}_3} + \dot{n}_{1\text{O}_2} + \dot{n}_{1\text{N}_2} + \dot{n}_{1\text{H}_2\text{O}} + \dot{\xi}$$

En la alimentación se tiene:

$$\dot{n}_{1\text{NH}_3} = 6 \frac{\text{mol}}{\text{h}}, \dot{n}_{1\text{O}_2} = 6 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

La conversión fraccional de un componente en un reactor químico se expresa como:

$$f_i = \frac{\dot{n}_{i\text{entrada}} - \dot{n}_{i\text{salida}}}{\dot{n}_{i\text{entrada}}}$$

Para el oxígeno:

$$f_{\text{O}_2} = \frac{\dot{n}_{1\text{O}_2} - \dot{n}_{2\text{O}_2}}{\dot{n}_{1\text{O}_2}}$$

Se sustituye el valor de alimentación y la conversión, y se calcula el flujo de salida del oxígeno:

$$f_{\text{O}_2} = \frac{\dot{n}_{1\text{O}_2} - \dot{n}_{2\text{O}_2}}{\dot{n}_{1\text{O}_2}}$$

$$\dot{n}_{2\text{O}_2} = \dot{n}_{1\text{O}_2} - f_{\text{O}_2}(\dot{n}_{1\text{O}_2})$$

$$\dot{n}_{2\text{O}_2} = 6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - 0.6 \left(6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) = 2.4 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Utilizando $\dot{n}_{2\text{O}_2}$ en el balance por componentes de oxígeno se obtiene:

$$\dot{n}_{2\text{O}_2} = \dot{n}_{1\text{O}_2} - 3\dot{\xi}$$

$$2.4 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - 3\dot{\xi}$$

$$\dot{\xi} = 1.2 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Con el avance de reacción en los balances por componentes:

$$\dot{n}_{2\text{NH}_3} = 1.2 \frac{\text{mol}}{\text{h}}, \quad \dot{n}_{2\text{N}_2} = 2.4 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}} = 7.2 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

2. Balance atómico:

El balance atómico no depende de la estequiometría de la reacción, solo depende del número de átomos a la entrada y salida del proceso:

$$\text{N: } \dot{n}_{1\text{NH}_3} = \dot{n}_{2\text{NH}_3} + 2\dot{n}_{2\text{N}_2}$$

$$\text{N: } 6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = \dot{n}_{2\text{NH}_3} + 2\dot{n}_{2\text{N}_2}$$

$$\text{O: } 2 \dot{n}_{1\text{O}_2} = 2\dot{n}_{2\text{O}_2} + \dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}}$$

$$\text{O: } 2 \left(6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) = 2\dot{n}_{2\text{O}_2} + \dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}}$$

$$\text{H: } 3\dot{n}_{1\text{NH}_3} = 3\dot{n}_{2\text{NH}_3} + 2\dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}}$$

$$\text{H: } 3 \left(6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) = 3\dot{n}_{2\text{NH}_3} + 2\dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}}$$

La conversión fraccional para el oxígeno es:

$$f_{\text{O}_2} = \frac{\dot{n}_{1\text{O}_2} - \dot{n}_{2\text{O}_2}}{\dot{n}_{1\text{O}_2}}$$

$$\dot{n}_{2\text{O}_2} = \dot{n}_{1\text{O}_2} - f_{\text{O}_2}(\dot{n}_{1\text{O}_2})$$

$$\dot{n}_{2\text{O}_2} = 6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - 0.6 \left(6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) = 2.4 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Se sustituye el valor de $\dot{n}_{2\text{O}_2}$ en el balance atómico del oxígeno:

$$\text{N: } 6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = \dot{n}_{2\text{NH}_3} + 2\dot{n}_{2\text{N}_2} \quad (\text{i})$$

$$\text{O: } 2 \left(6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) = 2 \left(2.4 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) + \dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}}$$

$$7.2 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = \dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}} \quad (\text{ii})$$

$$\text{H: } 3 \left(6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) = 3\dot{n}_{2\text{NH}_3} + 2\dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}} \quad (\text{iii})$$

Reemplazando la ecuación (ii) en la ecuación (iii) se tiene:

$$3 \left(6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) = 3\dot{n}_{2\text{NH}_3} + 2 \left(7.2 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right)$$

$$\dot{n}_{2\text{NH}_3} = 1.2 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Sustituyendo $\dot{n}_{2\text{NH}_3}$ en la ecuación (i):

$$6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 1.2 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + 2\dot{n}_{2\text{N}_2}$$

$$\dot{n}_{2\text{N}_2} = 2.4 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Los resultados son:

$$\dot{n}_{2\text{N}_2} = 2.4 \frac{\text{mol}}{\text{h}}, \dot{n}_{2\text{NH}_3} = 1.2 \frac{\text{mol}}{\text{h}}, \dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}} = 7.2 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

3. Balances por especies moleculares:

Para este método es necesario conocer las moles reaccionadas del reactivo limitante.

El enunciado proporciona al oxígeno como reactivo limitante:

$$f = \frac{\text{moles reaccionadas de reactivo limitante}}{\text{moles en la alimentación del reactivo limitante}}$$

$$0.6 = \frac{\text{moles reaccionadas de reactivo limitante}}{6 \frac{\text{mol}}{\text{h}}}$$

$$\text{moles reaccionadas de O}_2 = 0.6 \left(6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) = 3.6 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_{2\text{O}_2} = 6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - 3.6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 2.4 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

El NH_3 se consume en la reacción de acuerdo a la relación estequiométrica:

$$3.6 \frac{\text{mol O}_2}{\text{h}} \times \frac{4 \text{ mol NH}_3}{3 \text{ mol O}_2} = 4.8 \frac{\text{mol consumidas}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_{2\text{NH}_3} = 6 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - 4.8 \frac{\text{mol consumidas}}{\text{h}} = 1.2 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

El N_2 se obtiene en la reacción:

$$3.6 \frac{\text{mol O}_2}{\text{h}} \times \frac{2 \text{ mol N}_2}{3 \text{ mol O}_2} = 2.4 \frac{\text{mol generadas}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_{2\text{N}_2} = 2.4 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

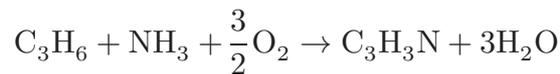
El H_2O se obtiene en la reacción:

$$3.6 \frac{\text{mol O}_2}{\text{h}} \times \frac{6 \text{ mol H}_2\text{O}}{3 \text{ mol O}_2} = 7.2 \frac{\text{mol generadas}}{\text{h}}$$

Se puede observar que los tres métodos arrojan los mismos resultados.

Ejemplo 3.4 Reacción para Obtener Acrilonitrilo

Ingresa una alimentación a un reactor con una composición de 15% de amoníaco, 13% de propileno y 72% de aire. Se da una conversión de 27% en el reactivo limitante. Utilizar todos los métodos de balance de materia para obtener los flujos molares en la salida del reactor, determinar el porcentaje de exceso de los reactivos. La reacción para obtención de acrilonitrilo se muestra a continuación:



Solución

El reactor se encuentra en estado estacionario.

Base de cálculo: 150 mol/h de alimentación.

El diagrama del proceso es:

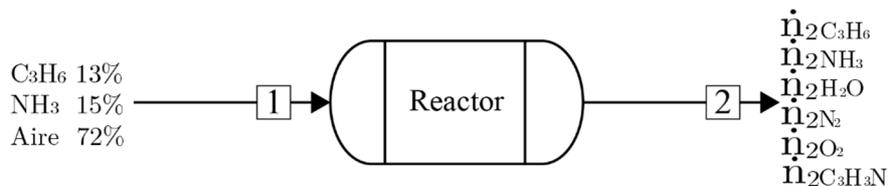


FIGURA DEL EJEMPLO 3.4.1

Reactor de acrilonitrilo

Las relaciones para determinar el reactivo limitante son:

$$\frac{\dot{n}_{i0}}{\gamma_i}$$

Para el amoniaco:

$$\frac{\dot{n}_{\text{NH}_3}}{\gamma_{\text{NH}_3}} = \frac{0.15(150 \text{ mol/h})}{1} = 22.5 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Para el propileno:

$$\frac{\dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_6}}{\gamma_{\text{C}_3\text{H}_6}} = \frac{0.13 \left(150 \frac{\text{mol}}{\text{h}}\right)}{1} = 19.5 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Para el oxígeno:

$$\frac{\dot{n}_{\text{O}_2}}{\gamma_{\text{O}_2}} = \frac{0.72 \left(150 \frac{\text{mol}}{\text{h}}\right) 0.21}{3/2} = 15.12 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

El reactivo limitante es el oxígeno. Entonces, se calcula el porcentaje en exceso de propileno y amoniaco:

Para el amoniaco:

$$\text{Fracción en exceso de NH}_3 = \frac{\dot{n}_{\text{NH}_3} - \dot{n}_{\text{NH}_3 \text{ estequio}}}{\dot{n}_{\text{NH}_3 \text{ estequio}}}$$

$$\dot{n}_{\text{NH}_3 \text{ estequio}} = 22.68 \text{ mol O}_2 \times \frac{1 \text{ mol NH}_3}{3/2 \text{ mol O}_2} = 15.12 \text{ mol/h NH}_3$$

$$\text{Fracción en exceso de NH}_3 = \frac{22.5 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - 15.12 \frac{\text{mol}}{\text{h}}}{15.12 \frac{\text{mol}}{\text{h}}} = 0.488$$

$$\text{porcentaje de exceso de NH}_3 = 100\% \times 0.488 = 48.8\%$$

Para el propileno:

$$\text{Fracción en exceso de C}_3\text{H}_6 = \frac{\dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_6} - \dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_6 \text{ estequio}}}{\dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_6 \text{ estequio}}}$$

$$\text{Fracción en exceso de } C_3H_6 = \frac{19.5 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - 15.12 \frac{\text{mol}}{\text{h}}}{15.12 \frac{\text{mol}}{\text{h}}} = 0.29$$

$$\text{porcentaje de exceso de } C_3H_6 = 100\% \times 0.29 = 29\%$$

Por avance de reacción:

La ecuación para el balance de materia con avance de reacción es:

$$\dot{n}_i = \dot{n}_{i0} + \gamma \dot{\xi}$$

Para el propileno:

$$\dot{n}_{2C_3H_6} = 19.5 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - \dot{\xi}$$

Para el amoniaco:

$$\dot{n}_{2NH_3} = 22.5 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - \dot{\xi}$$

Para el oxígeno:

$$\dot{n}_{2O_2} = 22.68 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - \frac{3}{2} \dot{\xi}$$

Para el acrilonitrilo:

$$\dot{n}_{2C_3H_3N} = \dot{\xi}$$

Para el agua:

$$\dot{n}_{2H_2O} = 3\dot{\xi}$$

Utilizando la conversión y el oxígeno (reactivo limitante) obtenido, se calcula el flujo molar de salida de oxígeno:

$$f_{O_2} = \frac{\dot{n}_{1O_2} - \dot{n}_{2O_2}}{\dot{n}_{1O_2}}$$

$$0.27 = \frac{22.68 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - \dot{n}_{2\text{O}_2}}{22.68 \frac{\text{mol}}{\text{h}}}$$

$$\dot{n}_{2\text{O}_2} = 16.556 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Se reemplaza $\dot{n}_{2\text{O}_2}$ en el balance por componente del oxígeno:

$$16.556 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 22.68 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - \frac{3}{2} \dot{\xi}$$

$$\dot{\xi} = 4.083 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Los flujos molares de salida del reactor se obtienen sustituyendo $\dot{\xi}$ en los balances por componentes:

$$\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_6} = 15.417 \frac{\text{mol}}{\text{h}}, \dot{n}_{2\text{NH}_3} = 18.417 \frac{\text{mol}}{\text{h}}, \dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_3\text{N}} = 4.083 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}} = 12.249 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Por balance atómico:

$$\text{entrada} = \text{salida}$$

$$\text{C: } 3\dot{n}_{1\text{C}_3\text{H}_6} = 3\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_6} + 3\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_3\text{N}}$$

$$\text{O: } 2\dot{n}_{1\text{O}_2} = \dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}} + 2\dot{n}_{2\text{O}_2}$$

$$\text{H: } 6\dot{n}_{1\text{C}_3\text{H}_6} + 3\dot{n}_{1\text{NH}_3} = 6\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_6} + 3\dot{n}_{2\text{NH}_3} + 2\dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}} + 3\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_3\text{N}}$$

$$\text{N: } \dot{n}_{1\text{NH}_3} + 2\dot{n}_{1\text{N}_2} = \dot{n}_{2\text{NH}_3} + \dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_3\text{N}} + 2\dot{n}_{1\text{N}_2}$$

La conversión en el reactor es:

$$0.27 = \frac{22.68 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - \dot{n}_{2\text{O}_2}}{22.68 \frac{\text{mol}}{\text{h}}}$$

$$\dot{n}_{2\text{O}_2} = 16.556 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Sustituyendo $\dot{n}_{2\text{O}_2}$ en el balance atómico para el oxígeno:

$$2(150)(0.21)(0.72) = \dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}} + 2(16.556)$$

$$\dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}} = 12.249 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Sustituyendo $\dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}}$ en el balance atómico para el hidrógeno:

$$6(0.13)(150) + 3(0.15)(150) = 6\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_6} + 3\dot{n}_{2\text{NH}_3} + 2(12.249)$$

$$160.002 = 6\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_6} + 3\dot{n}_{2\text{NH}_3} + 3\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_3\text{N}} \quad (\text{i})$$

Del balance atómico para el carbono y balance atómico para el nitrógeno:

$$3(0.13)(150) = 3\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_6} + 3\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_3\text{N}}$$

$$58.5 = 3\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_6} + 3\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_3\text{N}} \quad (\text{ii})$$

$$0.15(150) + 2(0.79)(150) = \dot{n}_{2\text{NH}_3} + \dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_3\text{N}} + 2(0.79)(150)$$

$$22.5 = \dot{n}_{2\text{NH}_3} + \dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_3\text{N}} \quad (\text{iii})$$

Sustituyendo la ecuación (iii) en (ii):

$$58.5 = 3\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_6} + 3(22.5 - \dot{n}_{2\text{NH}_3})$$

$$-9 = 3\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_6} - 3\dot{n}_{2\text{NH}_3} \quad (\text{iv})$$

Arreglando y resolviendo la ecuación (i) entre (iv), y la ecuación de balance atómico para el carbono se tiene:

$$\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_6} = 15.417 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_{2\text{NH}_3} = 18.417 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_3\text{N}} = 4.083 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Por balance molecular:

Usando la estequiometria de la reacción química:

acumulación = entrada – salida + generación – consumo

$$f = 0.27 = \frac{22.68 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - n_{2\text{O}_2}}{22.68 \frac{\text{mol}}{\text{h}}}$$

$$\dot{n}_{2\text{O}_2} = 16.556 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Se calculan las moles consumidas del reactivo limitante:

$$\text{moles consumidas de } \dot{n}_{2\text{O}_2} = 6.124 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Balances de materia por especies moleculares:

Para el propileno consumido:

0 = entrada – salida + generación – consumo

$$0 = \dot{n}_{1\text{C}_3\text{H}_6} - \dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_6} + 0 - \text{consumo}$$

$$0 = 19.5 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - \dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_6} + 0 - 6.124 \text{ mol O}_2 \left(\frac{1 \text{ mol C}_3\text{H}_6}{1.5 \text{ mol O}_2} \right)$$

$$\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_6} = 15.417 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Para el amoníaco:

$$0 = \text{entrada} - \text{salida} + \text{generación} - \text{consumo}$$

$$0 = \dot{n}_{1\text{NH}_3} - \dot{n}_{2\text{NH}_3} + 0 - \text{consumo}$$

$$0 = 22.5 \frac{\text{mol}}{\text{h}} - \dot{n}_{2\text{NH}_3} + 0 - 6.124 \text{ mol O}_2 \left(\frac{1 \text{ mol NH}_3}{1.5 \text{ mol O}_2} \right)$$

$$\dot{n}_{2\text{NH}_3} = 18.147 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Para el acrilonitrilo:

$$0 = \text{entrada} - \text{salida} + \text{generación} - \text{consumo}$$

$$0 = 0 - \dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_3\text{N}} + \text{generación} - 0$$

$$0 = -\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_3\text{N}} + 0 - 6.124 \text{ mol O}_2 \left(\frac{1 \text{ mol C}_3\text{H}_3\text{N}}{1.5 \text{ mol O}_2} \right)$$

$$\dot{n}_{2\text{C}_3\text{H}_3\text{N}} = 4.083 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Para el agua:

$$0 = \text{entrada} - \text{salida} + \text{generación} - \text{consumo}$$

$$0 = 0 - \dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}} + \text{generación} - 0$$

$$0 = -\dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}} + 0 - 6.124 \text{ mol O}_2 \left(\frac{3 \text{ mol H}_2\text{O}}{1.5 \text{ mol O}_2} \right)$$

$$\dot{n}_{2\text{H}_2\text{O}} = 12.248 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

3.6 Reacciones Múltiples por el Método de Avance de Reacción

En procesos industriales es común tener reacciones secundarias, que generan productos indeseados, y a su vez estos productos pueden reaccionar para formar productos de bajo interés. Una reacción secundaria no deseada genera problemas

económicos en la industria, porque se necesita aumentar la alimentación de reactivo para obtener la cantidad de producto deseado. Un ingeniero en el diseño de reactores considera la maximización de los productos deseados y la minimización de productos indeseados, así como las condiciones en las que operará el reactor.

Para conocer el predominio de una reacción sobre las reacciones secundarias que compiten en un reactor se utilizan los términos de selectividad y rendimiento.

3.6.1 Rendimiento

El rendimiento se puede definir de la siguiente manera:

$$\text{rendimiento} = \frac{\text{moles formadas del producto deseado}}{\text{moles deseadas en conversión completa del reactivo limitante}}$$

$$\text{rendimiento} = \frac{\text{moles formadas del producto deseado}}{\text{moles del reactivo en la alimentación}}$$

Otra forma de calcular el rendimiento es las moles que se forman del producto deseado para las moles del reactivo que se consume.

3.6.2 Selectividad

La selectividad es la relación entre la cantidad en moles de producto deseado formado y la cantidad en moles de los productos no deseados formados en el reactor químico. Un valor alto la relación indica mayor control de la reacción deseada en el sistema de reacciones múltiples.

$$\text{Selectividad} = \frac{\text{moles de producto deseado}}{\text{moles de productos indeseados}}$$

3.6.3 Avance de reacción para sistemas con múltiples reacciones

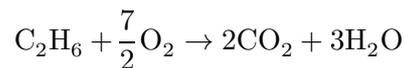
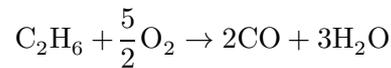
En reacciones múltiples el avance de reacción tiene el mismo concepto, con la diferencia que existirá un avance de reacción para cada reacción del sistema. En un proceso en estado estacionario con múltiples reacciones para un componente i , se aplicará la siguiente ecuación:

$$\dot{n}_i = \dot{n}_i + \sum_j \gamma_{ij} \dot{\xi}_j$$

donde (γ_{ij}) es el coeficiente estequiométrico de la especie en cada reacción y $(\dot{\xi}_j)$ es el avance de reacción para cada reacción.

Ejemplo 3.5 Reacción de Combustión de Hidrocarburo

En las reacciones de combustión de hidrocarburos por lo general se obtienen como productos al dióxido de carbono y al monóxido de carbono, se supone que el dióxido de carbono es un producto no deseado en el sistema de reacciones dado:



En un reactor entra una mezcla de 150 moles de etano y 600 moles de oxígeno. La corriente de salida del reactor se compone de 150 moles de dióxido de carbono, 40 moles de etano, 60 moles de monóxido de carbono, 250 moles de oxígeno, y 250 moles de agua. Calcular la selectividad y el rendimiento en el reactor con una conversión del 75%.

Solución

rendimiento

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{moles formadas del producto deseado}}{\text{moles deseadas en conversión completa del reactivo limitante}} \\ &= \frac{60 \text{ moles de CO}}{300 \text{ moles de CO}} = 0.2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{rendimiento} &= \frac{\text{moles formadas del producto deseado}}{\text{moles del reactivo en la alimentación}} \\ &= \frac{60 \text{ moles de CO}}{150 \text{ moles de C}_2\text{H}_6} = 0.4 \end{aligned}$$

Aplicando el concepto de selectividad se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Selectividad} &= \frac{\text{moles de producto deseado}}{\text{moles de productos indeseados}} \\ &= \frac{60 \text{ moles de CO}}{150 \text{ moles}} = 0.4 \end{aligned}$$

El valor bajo de selectividad indica la reacción favorecida es la no deseada.

Ejemplo 3.6 Deshidrogenación de Etano

En la deshidrogenación catalítica de etano a etileno se alimenta una composición de 75% de C_2H_6 con inerte a un reactor. En este proceso se obtiene etileno con rendimiento de 0.5, y una conversión de etano (C_2H_6) de 0.6. Encontrar la selectividad de etileno y las composiciones molares de la corriente de salida del reactor.

En un reactor en estado estacionario se dan las siguientes reacciones:



Solución

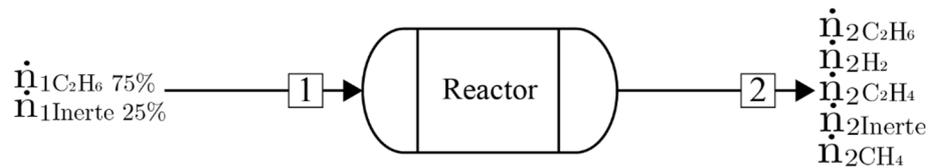
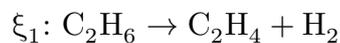


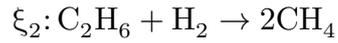
FIGURA DEL EJEMPLO 3.6.1

Deshidrogenación de etano

Base de cálculo: No se especifica una cantidad molar en la alimentación, por tanto, se asumirá una alimentación de 150 moles.

Existe un avance de reacción para cada reacción química:





Para mayor facilidad en los cálculos de balance de materia, el avance de reacción es el método apropiado en este problema:

Para el etano:

$$\begin{aligned} n_{2\text{C}_2\text{H}_6} &= n_{1\text{C}_2\text{H}_6} - \xi_1 - \xi_2 \\ n_{2\text{C}_2\text{H}_6} &= 112.5 \text{ mol} - \xi_1 - \xi_2 \end{aligned} \quad (\text{i})$$

Para el etileno:

$$\begin{aligned} n_{2\text{C}_2\text{H}_4} &= n_{1\text{C}_2\text{H}_4} + \xi_1 \\ n_{2\text{C}_2\text{H}_4} &= \xi_1 \end{aligned} \quad (\text{ii})$$

Para el hidrógeno:

$$\begin{aligned} n_{2\text{H}_2} &= n_{1\text{H}_2} + \xi_1 - \xi_2 \\ n_{2\text{H}_2} &= \xi_1 - \xi_2 \end{aligned} \quad (\text{iii})$$

Para el metano:

$$\begin{aligned} n_{2\text{CH}_4} &= n_{1\text{CH}_4} + 2\xi_2 \\ n_{2\text{CH}_4} &= 2\xi_2 \end{aligned} \quad (\text{iv})$$

La conversión está dada por:

$$\begin{aligned} f_{\text{C}_2\text{H}_6} &= \frac{n_{1\text{C}_2\text{H}_6} - n_{2\text{C}_2\text{H}_6}}{n_{1\text{C}_2\text{H}_6}} \\ 0.6 &= \frac{112.5 - n_{2\text{C}_2\text{H}_6}}{112.5} \end{aligned}$$

Las moles de etano en la salida del reactor son:

$$n_{2\text{C}_2\text{H}_6} = 45 \text{ mol}$$

Con el concepto de rendimiento se puede calcular las moles de etileno en la salida del reactor, entonces:

$$\text{rendimiento} = \frac{\text{moles formadas del producto deseado}}{\text{moles deseadas en conversión completa del reactivo limitante}}$$

$$0.50 = \frac{n_{\text{C}_2\text{H}_4}}{112.5}$$

$$n_{\text{C}_2\text{H}_4} = 56.25 \text{ mol}$$

Reemplazando el valor de $n_{\text{C}_2\text{H}_4}$ en la ecuación (ii), el valor del avance de reacción (ξ_1) será:

$$56.25 \text{ mol} = \xi_1$$

Sustituyendo los valores de $n_{\text{C}_2\text{H}_6}$ y ξ_1 en la ecuación (i):

$$45 \text{ mol} = 112.5 \text{ mol} - 56.25 \text{ mol} - \xi_2$$

$$\xi_2 = 11.25 \text{ mol}$$

Los valores de ξ_2 y ξ_1 en la ecuación (iii):

$$n_{\text{H}_2} = 56.25 \text{ mol} - 11.25 \text{ mol}$$

$$n_{\text{H}_2} = 45 \text{ mol}$$

Sustituyendo ξ_2 en la ecuación (iv):

$$n_{\text{CH}_4} = 2(11.25 \text{ mol})$$

$$n_{\text{CH}_4} = 22.5 \text{ mol}$$

3.7 Balance por Especies Moleculares en Múltiples Reacciones

Este enfoque en un sistema de múltiples reacciones se basa en escoger una especie molecular que sea exclusiva de cada reacción. Con la especie química elegida se

realiza un balance de materia para calcular la cantidad de moles generadas o consumidas en la reacción. Se consideran las siguientes reacciones en la producción de benceno:

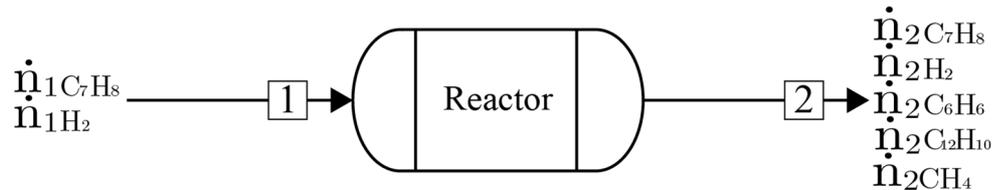
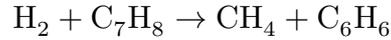


FIGURA 3.3

Producción de benceno

En la primera reacción química se tienen dos especies únicas, y en la reacción secundaria se encuentra una especie única. El número de moles que reaccionan en la primera reacción puede ser calculado con la cantidad de tolueno (consumido) o metano (generado) en el reactor. Para calcular las cantidades de las demás especies de la primera reacción se puede expresar en términos del número de moles de tolueno o metano considerando los coeficientes estequiométricos.

$$r_{\text{C}_7\text{H}_8} = \dot{n}_1 \text{C}_7\text{H}_8 - \dot{n}_2 \text{C}_7\text{H}_8$$

donde ($r_{\text{C}_7\text{H}_8}$) es la cantidad en moles de tolueno consumido en la reacción.

El número de moles que reaccionan en la segunda reacción se puede calcular por la cantidad de bifenilo porque es único en la reacción secundaria. Así mismo, las demás cantidades se calculan en términos de la cantidad de bifenilo considerando la relación de los coeficientes estequiométricos.

$$r_{\text{C}_{12}\text{H}_{10}} = \dot{n}_2 \text{C}_{12}\text{H}_{10}$$

donde ($r_{\text{C}_{12}\text{H}_{10}}$) es la cantidad en moles de bifenilo generado en la reacción.

Balance de materia para las demás especies químicas:

Para el hidrógeno:

$$\dot{n}_{2H_2} = \dot{n}_{2H_2} - (\dot{n}_{1C_7H_8} - \dot{n}_{2C_7H_8}) + \dot{n}_{2C_{12}H_{10}}$$

Para el metano:

$$\dot{n}_{2CH_4} = \dot{n}_{1C_7H_8} - \dot{n}_{2C_7H_8}$$

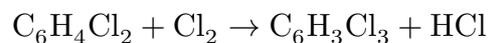
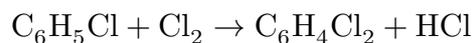
Para el benceno:

$$\dot{n}_{2C_6H_6} = \dot{n}_{1C_6H_6} + (\dot{n}_{1C_7H_8} - \dot{n}_{2C_7H_8}) - \frac{1}{2}\dot{n}_{2C_{12}H_{10}}$$

Ejemplo 3.7 Balance por Componentes Moleculares en Múltiples Reacciones

Se implementa un sistema de reacción para la obtención del monoclorobenceno en el que se alimenta al reactor un flujo molar de 50 kmol/h, con una composición de 40% benceno y 60% cloro. En la salida del reactor se obtiene 2 kmol/h de cloro, 4 kmol/h de monoclorobenceno y 6 kmol/h de diclorobenceno. Determinar la fracción de conversión del benceno. Utilizar los tres enfoques de balance de materia para reacciones múltiples.

Las reacciones son las siguientes:



Solución

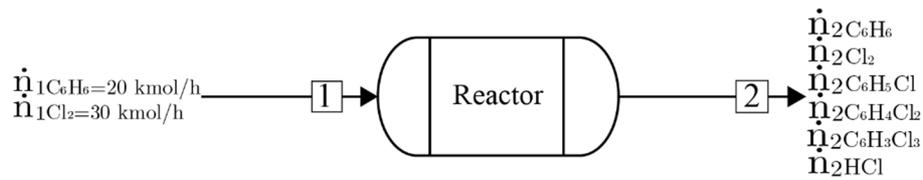


FIGURA DEL EJEMPLO 3.7.1

Producción de monoclorobenceno

1. Avance de reacción:

Cada reacción tiene su avance de reacción:

Primera reacción: $\dot{\xi}_1$

Segunda reacción: $\dot{\xi}_2$

Tercera reacción: $\dot{\xi}_3$

Balance por componentes:

Para el benceno:

$$\dot{n}_{2C_6H_6} = \dot{n}_{1C_6H_6} - \dot{\xi}_1 \quad (\text{i})$$

Para el cloro:

$$\dot{n}_{2Cl_2} = \dot{n}_{1Cl_2} - \dot{\xi}_1 - \dot{\xi}_2 - \dot{\xi}_3 \quad (\text{ii})$$

Para el monoclorobenceno:

$$\dot{n}_{2C_6H_5Cl} = \dot{n}_{1C_6H_5Cl} + \dot{\xi}_1 - \dot{\xi}_2 \quad (\text{iii})$$

Para el ácido clorhídrico:

$$\dot{n}_{2HCl} = \dot{n}_{1HCl} + \dot{\xi}_1 + \dot{\xi}_2 + \dot{\xi}_3 \quad (\text{iv})$$

Para el diclorobenceno:

$$\dot{n}_{2C_6H_4Cl_2} = \dot{n}_{1C_6H_4Cl_2} + \dot{\xi}_2 - \dot{\xi}_3 \quad (\text{v})$$

Para el triclorobenceno

$$\dot{n}_{2C_2H_3Cl_3} = \dot{n}_{1C_2H_3Cl_3} + \dot{\xi}_3 \quad (\text{vi})$$

Reemplazando los valores establecidos en el enunciado del problema:

Para el benceno:

$$\dot{n}_{2C_6H_6} = 20 - \dot{\xi}_1$$

Para el cloro:

$$2 = 30 - \dot{\xi}_1 - \dot{\xi}_2 - \dot{\xi}_3$$

Para el monoclorobenceno:

$$4 = \dot{\xi}_1 - \dot{\xi}_2$$

Para el ácido clorhídrico:

$$\dot{n}_{2HCl} = \dot{\xi}_1 + \dot{\xi}_2 + \dot{\xi}_3$$

Para el diclorobenceno:

$$6 = \dot{\xi}_2 - \dot{\xi}_3$$

Para el triclorobenceno

$$\dot{n}_{2C_2H_3Cl_3} = \dot{\xi}_3$$

Despejando $\dot{\xi}_1$ de la ecuación (iii) y $\dot{\xi}_3$ de la ecuación (v):

$$\dot{\xi}_1 = 4 + \dot{\xi}_2$$

$$\dot{\xi}_3 = \dot{\xi}_2 - 6$$

Al sustituir $\dot{\xi}_3$ y $\dot{\xi}_1$ en la ecuación (ii), se encontrará el valor de $\dot{\xi}_2$:

$$2 = 30 - (4 + \dot{\xi}_2) - \dot{\xi}_2 - (\dot{\xi}_2 - 6)$$

$$\dot{\xi}_2 = 10 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Con el valor de $\dot{\xi}_2$ se puede encontrar el valor de $\dot{\xi}_1$ y $\dot{\xi}_3$:

$$\dot{\xi}_1 = 4 + 10 = 14 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{\xi}_3 = 10 - 6 = 4 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Con los valores de los avances de cada reacción, reemplazando en cada balance de materia por componente se tiene:

$$\dot{n}_{2\text{C}_6\text{H}_6} = 20 - 14 = 6 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_{2\text{HCl}} = 14 + 10 + 4 = 28 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_{2\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}_3} = 4 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Con el concepto de conversión, para el benceno:

$$f_{\text{C}_6\text{H}_6} = \frac{\dot{n}_{1\text{C}_6\text{H}_6} - \dot{n}_{2\text{C}_6\text{H}_6}}{\dot{n}_{1\text{C}_6\text{H}_6}}$$

$$f_{\text{C}_6\text{H}_6} = \frac{20 \text{ mol/h} - 6 \text{ mol/h}}{20 \text{ mol/h}} = 0.7$$

2. Balance atómico:

Los balances atómicos serán:

$$\text{Para el C: } 6\dot{n}_{1\text{C}_6\text{H}_6} = 6\dot{n}_{2\text{C}_6\text{H}_6} + 6\dot{n}_{2\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}} + 6\dot{n}_{2\text{C}_6\text{H}_4\text{Cl}_2} + 6\dot{n}_{2\text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_3}$$

$$\begin{aligned} \text{Para el H: } 6\dot{n}_{1\text{C}_6\text{H}_6} \\ = 6\dot{n}_{2\text{C}_6\text{H}_6} + 5\dot{n}_{2\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}} + 4\dot{n}_{2\text{C}_6\text{H}_4\text{Cl}_2} + 3\dot{n}_{2\text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_3} + \dot{n}_{2\text{HCl}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Para el Cl: } 2\dot{n}_{1\text{Cl}_2} \\ = 2\dot{n}_{2\text{Cl}_2} + 1\dot{n}_{2\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}} + 2\dot{n}_{2\text{C}_6\text{H}_4\text{Cl}_2} + 3\dot{n}_{2\text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_3} + \dot{n}_{2\text{HCl}} \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores proporcionados en el problema, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$6\dot{n}_{2C_6H_6} + 6(4) + 6(6) + 6\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} = 6(20)$$

$$6\dot{n}_{2C_6H_6} + 6\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} = 60$$

$$6\dot{n}_{2C_6H_6} + 5(4) + 4(6) + 3\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} + \dot{n}_{2HCl} = 6(20)$$

$$6\dot{n}_{2C_6H_6} + 3\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} + \dot{n}_{2HCl} = 76$$

$$2(2) + 4 + 2(6) + 3\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} + \dot{n}_{2HCl} = 2(30)$$

$$3\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} + \dot{n}_{2HCl} = 40$$

Resolviendo la segunda y la tercera ecuación se obtiene:

$$\dot{n}_{2C_6H_6} = 6 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

El valor de $\dot{n}_{2C_6H_6}$ se sustituye en la ecuación de balance atómico del carbono:

$$6(6) + 6\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} = 60$$

$$\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} = 4 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

El valor de $\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3}$ se sustituye en la ecuación de balance atómico del cloro:

$$3(4) + \dot{n}_{2HCl} = 40$$

$$\dot{n}_{2HCl} = 28 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

3. Balance molecular:

Para este método se elige un componente de cada reacción que no se encuentre en otra reacción del sistema seleccionado. En el sistema de reacciones del problema se observa que la primera y tercera reacción tienen componentes únicos (benceno y triclorobenceno).

Como se detalló en la sección anterior, para resolver el balance de materia se calcula la cantidad de benceno consumido en la primera reacción mediante la siguiente ecuación:

$$r_{C_5H_6} = (\dot{n}_{1C_6H_6} - \dot{n}_{2C_6H_6})$$

$$r_{C_5H_6} = 30 - \dot{n}_{2C_6H_6}$$

Las moles de triclorobenceno generadas son:

$$r_{C_6H_3Cl_3} = (\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} - \dot{n}_{1C_6H_3Cl_3})$$

$$r_{C_6H_3Cl_3} = \dot{n}_{2C_6H_3Cl_3}$$

La segunda reacción no tiene un compuesto único, por tal razón se escoge el ácido clorhídrico

$$r_{HCl} = (\dot{n}_{2HCl} - \dot{n}_{1HCl}) - (\dot{n}_{1C_6H_6} - \dot{n}_{2C_6H_6}) - \dot{n}_{2C_6H_3Cl_3}$$

$$r_{HCl} = \dot{n}_{2HCl} - 20 + \dot{n}_{2C_6H_6} - \dot{n}_{2C_6H_3Cl_3}$$

Balance para las otras especies:

Para el cloro:

$$\begin{aligned} \dot{n}_{2Cl_2} = \dot{n}_{1Cl_2} - (\dot{n}_{1C_6H_6} - \dot{n}_{2C_6H_6}) \\ - (\dot{n}_{2HCl} + \dot{n}_{2C_6H_6} - \dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} - \dot{n}_{1C_6H_6}) - (\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2 = 30 - (20 - \dot{n}_{2C_6H_6}) - (\dot{n}_{2HCl} + \dot{n}_{2C_6H_6} - \dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} - 20) \\ - (\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3}) \end{aligned}$$

$$28 = \dot{n}_{2HCl}$$

Para el monoclorobenceno:

$$\begin{aligned} \dot{n}_{2C_6H_5Cl} = \dot{n}_{1C_6H_5Cl} + (\dot{n}_{1C_6H_6} - \dot{n}_{2C_6H_6}) \\ - (\dot{n}_{2HCl} + \dot{n}_{2C_6H_6} - \dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} - \dot{n}_{1C_6H_6}) \end{aligned}$$

$$4 = (20 - \dot{n}_{2C_6H_6}) - (\dot{n}_{2HCl} + \dot{n}_{2C_6H_6} - \dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} - 20)$$

$$-36 = -2\dot{n}_{2C_6H_6} - \dot{n}_{2HCl} + \dot{n}_{2C_6H_3Cl_3}$$

Para el diclorobenceno:

$$\dot{n}_{2C_6H_4Cl_2} = \dot{n}_{1C_6H_4Cl_2} + (\dot{n}_{2HCl} + \dot{n}_{2C_6H_6} - \dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} - \dot{n}_{1C_6H_6}) - (\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3})$$

$$6 = (\dot{n}_{2HCl} + \dot{n}_{2C_6H_6} - \dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} - 20) - (\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3})$$

$$26 = \dot{n}_{2HCl} + \dot{n}_{2C_6H_6} - 2\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3}$$

Sustituyendo el valor \dot{n}_{HCl} en las dos ecuaciones se tiene:

$$-36 = -2\dot{n}_{2C_6H_6} - 28 + \dot{n}_{2C_6H_3Cl_3}$$

$$-8 = -2\dot{n}_{2C_6H_6} + \dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} \quad (i)$$

$$26 = 28 + \dot{n}_{2C_6H_6} - 2\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3}$$

$$-2 = \dot{n}_{2C_6H_6} - 2\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} \quad (ii)$$

Al resolver las ecuaciones (i) y (ii) se obtienen los valores de benceno y triclorobenceno:

$$\dot{n}_{2C_6H_6} = 6 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_{2C_6H_3Cl_3} = 4 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

3.8 Análisis de Grados de Libertad en Sistemas con Reacción Química

En reacciones químicas el análisis de grados de libertad tiene un ligero cambio por las variables agregadas en las reacciones químicas, y el análisis varía dependiendo el enfoque utilizado en la resolución problemas de balance de materia en procesos reactivos. Se tiene un análisis similar para el balance por especies moleculares y avance de reacción:

$$\begin{aligned} \text{GDL} = & (\text{variables desconocidas}) + (\text{reacciones químicas independientes}) \\ & - (\text{balances por especies moleculares independientes}) \\ & - (\text{ecuaciones que relacionen variables}) \end{aligned}$$

Cuando se utilice el método de balance atómico, el análisis de grados de libertad será el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{GDL} = & (\text{variables desconocidas}) \\ & - (\text{balances por especies atómicas independientes}) \\ & - (\text{balances de especies moleculares no reactivas independientes}) \\ & - (\text{ecuaciones que relacionen variables}) \end{aligned}$$

En un sistema de múltiples reacciones, se consideran reacciones químicas independientes cuando estas ecuaciones estequiométricas no se pueden obtener de la combinación lineal de las otras reacciones estequiométricas presentes en el sistema. Por ejemplo, se tiene las siguientes reacciones químicas:



En este sistema de ecuaciones solo hay dos ecuaciones independientes, porque la ecuación (3) es igual a la suma de las ecuaciones (1) y (2). Por lo general el número de balances de materia es igual al número de compuestos independientes. Pero este análisis puede cambiar cuando se tienen relaciones iguales para dos compuestos en todo el proceso, este es el caso del aire que tiene una composición de 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno.

3.9 Equilibrio Químico

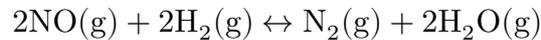
Desde el punto de vista de la cinética en reacciones químicas, se dice que generalmente las reacciones no son instantáneas. Por tanto, es necesario estimar

la velocidad de reacción, y conocer que las reacciones a menudo dan lugar a una reacción inversa.

En una reacción química el equilibrio se da cuando la velocidad de la reacción directa e inversa tienen la misma velocidad, ocasionando que las composiciones no varíen en el tiempo. Se debe tomar las variables que afectan a las velocidades de reacción, porque al afectar las velocidades directamente se afectará al equilibrio químico, estas variables son temperatura y concentración de reactivos.

Ejemplo 3.8 Equilibrio Químico

Considerando la siguiente reacción química:



Se tiene la constante de equilibrio

$$K = \frac{[y_{\text{H}_2\text{O}}]^2 [y_{\text{N}_2}]}{[y_{\text{NO}}]^2 [y_{\text{H}_2}]^2}$$

Con las cantidades molares iniciales de los componentes, obtener una expresión de la constante de equilibrio con el avance de reacción.

Solución

Con la definición de las fracciones molares de cada componente se tiene:

$$y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{T}}}$$

$$y_{\text{N}_2} = \frac{n_{\text{N}_2}}{n_{\text{T}}}$$

$$y_{\text{NO}} = \frac{n_{\text{NO}}}{n_{\text{T}}}$$

$$y_{\text{H}_2} = \frac{n_{\text{H}_2}}{n_{\text{T}}}$$

Balance de materia para cada componente:

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = n_{\text{H}_2\text{O}_o} + 2\xi$$

$$n_{\text{N}_2} = n_{\text{N}_2_o} + \xi$$

$$n_{\text{NO}} = n_{\text{NO}_o} - 2\xi$$

$$n_{\text{H}_2} = n_{\text{H}_2_o} - 2\xi$$

Sumando todas las ecuaciones de balance se obtiene la ecuación para las moles totales en el final de la reacción:

$$n_{\text{T}} = n_{\text{T}_o} - \xi$$

Se sustituye en la constante de equilibrio las ecuaciones obtenidas:

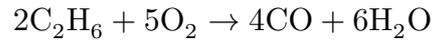
$$K = \frac{[y_{\text{H}_2\text{O}}]^2 [y_{\text{N}_2}]}{[y_{\text{NO}}]^2 [y_{\text{H}_2}]^2}$$

$$K = \frac{\left[\frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{T}}}\right]^2 \left[\frac{n_{\text{N}_2}}{n_{\text{T}}}\right]}{\left[\frac{n_{\text{NO}}}{n_{\text{T}}}\right]^2 \left[\frac{n_{\text{H}_2}}{n_{\text{T}}}\right]^2}$$

$$K = \frac{\left[\frac{n_{\text{H}_2\text{O}_o} + 2\xi}{n_{\text{T}_o} - \xi}\right]^2 \left[\frac{n_{\text{N}_2_o} + \xi}{n_{\text{T}_o} - \xi}\right]}{\left[\frac{n_{\text{NO}_o} - 2\xi}{n_{\text{T}_o} - \xi}\right]^2 \left[\frac{n_{\text{H}_2_o} - 2\xi}{n_{\text{T}_o} - \xi}\right]^2}$$

3.10 Reacciones de Combustión

Una de las reacciones más importantes en la industria es la reacción de combustión. Esta reacción se da entre un combustible con oxígeno con el objetivo de producir energía. Generalmente, los combustibles son hidrocarburos, algunos compuestos de azufre, entre otros. En la oxidación máxima del combustible se consigue la energía deseada. Por ejemplo, en las reacciones presentadas a continuación se puede observar la oxidación completa y la oxidación incompleta respectivamente



3.10.1 Aire teórico requerido y aire en exceso

La fuente de oxígeno para las reacciones de combustión es el aire (21% oxígeno, 79% nitrógeno). Para asegurar conversiones altas del combustible siempre se emplea exceso de aire.

El aire teórico es la caudal molar de aire que contiene al oxígeno teórico para una combustión completa del combustible.

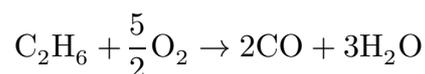
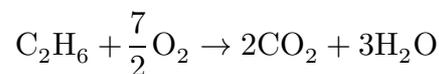
$$\dot{n}_{\text{aire teórico}} = \frac{\dot{n}_{\text{O}_2 \text{ teórico}}}{0.21}$$

El porcentaje de aire en exceso alimentado al reactor se calcula por:

$$\text{porcentaje de aire en exceso} = \frac{\dot{n}_{\text{aire alimentado}} - \dot{n}_{\text{aire teórico}}}{\dot{n}_{\text{aire teórico}}} \times 100\%$$

Ejemplo 3.9 Combustión del etano

En un reactor de combustión se quemará etano con aire en exceso (40%). El etano tendrá una conversión del 80%, 20% del etano que reacciona se convertirá en monóxido de carbono, y el resto reaccionará para formar dióxido de carbono. Calcular los flujos molares a la salida del reactor.



Solución

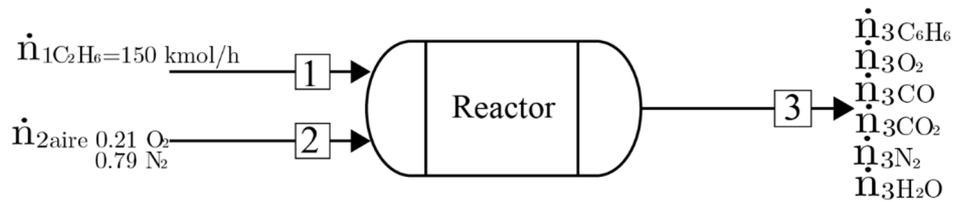


FIGURA DEL EJEMPLO 3.9.1

Esquema de proceso de combustión

Base de cálculo: 150 kmol/h de etano

En el análisis de grados de libertad:

Número de variables desconocidas: 7 (Flujos molares desconocidos)

Número de ecuaciones independientes: 4 (No se considera el aire)

Numero de relaciones de variables: 3 (conversión de etano, aire en exceso, y relación entre dióxido y monóxido de carbono)

Se calcula el aire alimentado aplicando el concepto de porcentaje de aire en exceso:

$$\text{porcentaje de aire en exceso} = \frac{\dot{n}_{\text{aire alimentado}} - \dot{n}_{\text{aire teórico}}}{\dot{n}_{\text{aire teórico}}} \times 100\%$$

Oxígeno teórico:

$$\dot{n}_{\text{O}_2 \text{ teórico}} = 150 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \times \left(\frac{3.5 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol C}_2\text{H}_6} \right) = 525 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \text{ O}_2$$

Aire teórico:

$$\dot{n}_{\text{aire teórico}} = \frac{\dot{n}_{\text{O}_2 \text{ teórico}}}{0.21}$$

$$\dot{n}_{\text{aire teórico}} = \frac{525 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \text{ O}_2}{0.21} = 2500 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

El aire alimentado es:

$$0.4 = \frac{\dot{n}_{\text{aire alimentado}} - 2500 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}}{2500 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}}$$

$$\dot{n}_{\text{aire alimentado}} = 3500 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

Del concepto de conversión:

$$f = \frac{\dot{n}_{1\text{C}_2\text{H}_6} - \dot{n}_{3\text{C}_2\text{H}_6}}{\dot{n}_{1\text{C}_2\text{H}_6}}$$

$$0.8 = \frac{150 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} - \dot{n}_{3\text{C}_2\text{H}_6}}{150 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}}$$

$$\dot{n}_{3\text{C}_2\text{H}_6} = 30 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

Se calcula la cantidad de etano consumido:

$$\dot{n}_{\text{C}_2\text{H}_6\text{consumido}} = 120 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

Balance molecular para el CO:

$$0 = \dot{n}_{1\text{CO}} - \dot{n}_{3\text{CO}} + \text{generación} - \text{consumo}$$

$$\dot{n}_{3\text{CO}} = 0.2 \left(120 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \text{C}_2\text{H}_6 \right) \times \frac{2 \text{ mol CO generado}}{1 \text{ mol de C}_2\text{H}_6\text{consumido}}$$

$$\dot{n}_{3\text{CO}} = 48 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

Balance del nitrógeno:

$$\dot{n}_{2\text{N}_2} = \dot{n}_{3\text{N}_2}$$

$$\dot{n}_{3\text{N}_2} = 0.79 \left(3500 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \right) = 2765 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

Balance atómico de los componentes:

$$\text{Para el C: } 2\dot{n}_{1\text{C}_2\text{H}_6} = 2\dot{n}_{3\text{C}_2\text{H}_6} + \dot{n}_{3\text{CO}} + \dot{n}_{3\text{CO}_2}$$

$$2(150) = 2(30) + 48 + \dot{n}_{3\text{CO}_2}$$

$$\dot{n}_{3\text{CO}_2} = 192 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$\text{Para el H: } 6\dot{n}_{1\text{C}_2\text{H}_6} = 6\dot{n}_{3\text{C}_2\text{H}_6} + 2\dot{n}_{3\text{H}_2\text{O}}$$

$$6(150) = 6(30) + 2\dot{n}_{3\text{H}_2\text{O}}$$

$$\dot{n}_{3\text{H}_2\text{O}} = 360 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$\text{Para el O: } 2\dot{n}_{2\text{O}_2} = 2\dot{n}_{3\text{O}_2} + \dot{n}_{3\text{H}_2\text{O}} + \dot{n}_{3\text{CO}} + 2\dot{n}_{3\text{CO}_2}$$

$$2(735) = 2\dot{n}_{3\text{O}_2} + 360 + 48 + 2(192)$$

$$\dot{n}_{3\text{O}_2} = 339 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

Ejercicios Propuestos

1. Para obtener 50 lb de Na_2O se mezclan 150 lb de sodio (Na) con 400 lb de O_2 . Calcular:
 - a) El reactivo limitante
 - b) El porcentaje de reactivo en exceso
 - c) La conversión fraccionaria
2. En un reactor en estado necesario se dan las siguientes reacciones químicas:



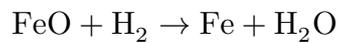
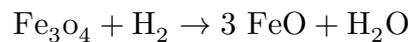
En la alimentación al reactor se tiene una composición molar de 15% inertes y el resto de etano. El rendimiento de etileno es 0.55, y la conversión fraccionaria en el reactor es 0.6. Calcular la composición en la corriente de producto.

3. ¿Cuál es el requerimiento de oxígeno para la combustión completa de propano con flujo molar de 120 mol/h?

Si se suministra 20 % en exceso de oxígeno, ¿Qué cantidad de agua se forma con una conversión del 80%?

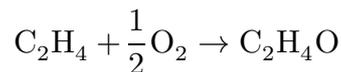
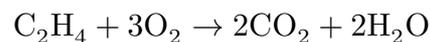
4. En un reactor estequiométrico se alimenta hidrógeno y nitrógeno con una relación de 3 a 1 respectivamente. Se pretender producir 500 mol/h de amoniaco con una conversión del 30% de nitrógeno. Determinar el caudal molar de alimentación al reactor.

5. La obtención de hierro se da mediante la reducción de magnetita mediante las siguientes reacciones:



En el reactor se alimentan 2 lbmol/min de magnetita y 4 lb/min de hidrógeno, en la corriente de producto del reactor se tiene 0.2 lbmol/h de (Fe_3O_4) y 1 lbmol/h de hierro. Determinar los caudales de todos los componentes en la corriente de producto.

6. En la oxidación de etileno para formar óxido de etileno se requiere evitar la oxidación completa, dando las siguientes reacciones en paralelo:



Se tiene una alimentación equimolar de etileno y oxígeno. Se alimentan 150 mol/s al reactor.

a) Dibujar y especificar el diagrama de flujo del proceso.

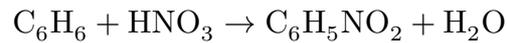
b) Con una conversión fraccionaria de 0.8 del etileno y rendimiento del de 0.7.

Use el término de avance de reacción en las ecuaciones balances de materia para calcular la composición de la corriente de producto del reactor.

7. En un reactor de hidrogenación de etileno (C_2H_4) y propileno (C_3H_6). La corriente de alimentación contiene 20 kmol de C_2H_4 , 20 kmol de C_3H_6 y 40 kmol de H_2 . La salida del reactor tendrá 17 kmol de C_2H_6 , 15 kmol de C_3H_8 y 3 kmol/h

de C_2H_4 . Calcular la cantidad de hidrógeno y propileno en la corriente de producto.

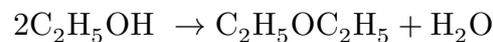
8. La anilina es un compuesto comercial que se obtiene de la hidrogenación del nitrobenzeno. Para obtener nitrobenzeno se hace reaccionar al benceno con ácido nítrico:



Al reactor es alimentado 500 kg de benceno y 1000 kg de solución ácida con una composición de 65% en peso de ácido nítrico y 35% de agua. Calcular el porcentaje en exceso y los caudales másicos desconocidos del proceso.

9. El formaldehído es producido industrialmente por oxidación de metanol, el subproducto de la reacción es agua. Es requerida una producción de formaldehído de 10 mol/ min. La oxidación es dada con 40% de aire en exceso. La conversión de metanol es del 92%. Determinar el flujo molar de entrada de aire al reactor.

10. Un reactor es empleado para producir dietil éter por deshidratación de etanol de acuerdo a la siguiente reacción

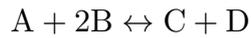


La conversión fraccionaria para el etanol es del 75%. El caudal de dietil éter en el producto es 1200 lb/h. Calcular la cantidad de alimentación que requiere el proceso.

11. A un horno se alimenta propano con flujo molar de 150 mol/h, el aire utilizado para la combustión está en un 40% en exceso. El 55% de propano es consumido para obtener 15 mol de dióxido de carbono por cada mol de monóxido de carbono. Calcular la cantidad de agua en la salida del horno.

12. En una reacción de combustión se alimenta una 35% de aire en exceso para quemar una mezcla de metil etil cetona. En la reacción se consume 62% de metil etil cetona y 89% de metano, parte del metano reacciona en forma incompleta para producir CO. En la salida se tiene 0.6% en moles de CO. Se alimenta 2 mol de la mezcla. Calcular las moles de oxígeno en la salida del horno.

13. En un reactor se dan las siguientes reacciones:



En el reactor se alimenta una corriente con una composición 20 moles de A, 60 moles de B y 10 moles de D, en la corriente de producto se obtiene un 35% de C, 25% de A y 8% de E. Calcular la conversión de A y B.

14. La oxidación de propileno en presencia de amoníaco produce acrilonitrilo. Esta reacción es altamente exotérmica.



En un reactor con un sistema de enfriamiento, es alimentada una corriente con una composición de 15% en moles de amoníaco, 20% en moles de propileno y el resto de aire. La conversión fraccionaria en el reactor es de 45%. Determinar el reactivo limitante y la composición de la corriente de salida del reactor. Asumir una base de cálculo de 200 mol/h.

Referencias

Felder, R., & Rousseau, R. (2004). *3 Felder-Balance masa.pdf*. Limusa Wiley.

GARAVITO, N. G. (2009). *Balance De Materia*.

Ghasem, N., & Henda, R. (2014). *Principles of Chemical Engineering Processes: Material and Energy Balances* (Second). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b17696>

Matar, S., & Hatch, L. F. (1994). *Chemistry of Petrochemical Processes*. Gulf Publishing.

Morris, A. E., Geiger, G., & Fine, H. A. (2011). *Handbook on Material and Energy Balance Calculations in Materials Processing*. Wiley.

Murphy, R. M. (2007). *Introducción a los Procesos Químicos: Principios, análisis y síntesis*. McGraw-Hill Interamericana.

Reklaitis, G. V., & Scheneider, D. R. (1986). *Balances de materia y energía*. Interamericana.