Compás
capacitación e investigación

Balances de Materia en Ingeniería Química:

Fundamentos, Análisis y Resolución de Ejercicios con Microsoft Excel y MATLAB

Tanya Alexandra Carchi Tandazo
Byron Gonzalo Lapo Calderón

© **Tanya Alexandra Carchi Tandazo**
Byron Gonzalo Lapo Calderón

© Editorial Grupo Compás, 2025
Guayaqui, Ecuador
www.grupocompas.com
http://repositorio.grupocompas.com

Primera edición, 2025-10-22

ISBN: 978-9942-33-952-2
DOI: http://doi.org/10.48190/978994233952-2
Distribución online
Acceso abierto

Cita
Carchi, T., Lapo, B. (2025) Balances de Materia en Ingeniería Química: Fundamentos, Análisis y Resolución de Ejercicios con Microsoft Excel y MATLAB. Editorial Grupo Compás

Este libro es parte de la colección de la Univesidad Técnica de Machala y ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad de la publicación. El copyright estimula la creatividad, defiende la diversidad en el ámbito de las ideas y el conocimiento, promueve la libre expresión y favorece una cultura viva. Quedan rigurosamente prohibidas, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright.

Índice de contenidos

SOBRE LOS AUTORES 147

Dedicatoria 6

Prefacio 7

Objetivos específicos del libro 8

CAPÍTULO I: Introducción al Balance de Materia 9

1.1. Conceptos Fundamentales 10

1.1.1. Proceso y Tipos de Proceso. 10

1.1.1.1. Continuos. 11

1.1.1.2. Por lotes. 12

1.1.1.3. Semicontinuos. 13

1.1.2. Definición de Sistema y Límites del Sistema. 13

1.1.2.1. Clasificación de sistemas: abiertos, cerrados y aislados. 14

1.1.3. Componentes clave: corrientes, propiedades intensivas y extensivas. 15

1.1.4. Estado estacionario y no estacionario. 16

1.1.4.1. Balance en estado estacionario. 17

1.1.4.3. Balance en estado transitorio. 17

1.1.5. Principios básicos de conservación de la masa. 18

1.1.6. Ecuación general de materia.-. 18

1.1.7. Grados de libertad. 20

1.1.8 Procedimiento y/o protocolo para resolver ejercicios de balance de materia en procesos químicos. 21

1.1.9. Ejemplos de aplicación a nivel industrial de balances de materia. ..22

CAPÍTULO II. Balances de Materia Sin Reacción Química 33

2.1. Sistemas de una sola unidad: conceptos básicos. 35

2.2. Sistemas de múltiples unidades: enfoques de resolución secuencial. ...36

2.2.1. Recirculación. 36

2.2.2. Derivación. 38

2.2.3. Purgado. 38

2.3. Ejercicios de aplicación de balance de materia sin reacción química. ...39

CAPÍTULO III. Balances de Materia con Reacción Química 52

3.1. Principios fundamentales: estequiometría y extensión de reacción. 53

3.2. Rendimiento, conversión y selectividad. 59

3.2.1. Rendimiento. 59

3.2.2. Conversión. 60

3.2.2.1. Conversión fraccional global. 61

3.2.2.2. Conversión fraccional en una sola pasada por el reactor. 61

3.2.3. Selectividad. 62

3.3. Sistemas con múltiples reacciones químicas. 62

3.4. Ejercicios de aplicación de balance de materia con reacción química 63

CAPÍTULO IV. Aplicaciones Computacionales para la Resolución de Balances de Materia con Microsoft Excel y MATLAB 84

4.1. Microsoft Excel 87

4.2. MATLAB 89

4.2.1. Operaciones elementales en MATLAB 91

4.3. Ejercicios desarrollados en Excel y MATLAB sobre Balance de Materia 95

Dedicatoria

Dedico este libro, en primer lugar, a Dios, fuente de fortaleza y guía en cada paso de mi vida; a mis padres, Rodrigo y Tanya, por su amor incondicional y ejemplo constante; a mi hermana Mayra, por su apoyo y compañía en todo momento; y a mi bello sobrino Rodriguito, quien con su ternura ilumina mis días y se convierte en mi mayor inspiración. Gracias a todos.

Con cariño Tanya

A mi esposa e hija, por ser el sostén silencioso de cada paso y el abrigo en los días difíciles. Mi niña, Luciana Yanay, cuya luz en su primer año de vida me enseñó nuevas formas de amor y esperanza; este libro es también para ti, para que crezcas con curiosidad y valentía. Y a todas las personas que desean mejorar y convertirse en buenos ingenieros químicos, que estas páginas les inspiren propósito para transformar la realidad con ciencia al servicio de la comunidad.

Byron

Prefacio

Este libro, titulado ***"Balances de Materia en Ingeniería Química: Fundamentos y Resolución de Ejercicios con Herramientas Computacionales en Microsoft Excel y MATLAB"***, nace con la intención de acompañar y fortalecer el proceso de formación de estudiantes de Ingeniería Química en una de las competencias más esenciales de su carrera: la comprensión y aplicación de los balances de materia. Este conocimiento no solo es la base para el análisis y diseño de procesos industriales, sino también una herramienta clave para abordar retos actuales relacionados con la eficiencia, la sostenibilidad y la optimización de recursos en el sector productivo.

A lo largo de los capítulos, se abordan tanto los fundamentos teóricos como la resolución de ejercicios prácticos, cubriendo desde sistemas sin reacción química hasta aquellos que incluyen reacciones. Además, se incorpora un capítulo dedicado al uso de herramientas computacionales como Microsoft Excel y MATLAB, permitiendo al lector modelar y resolver balances de manera automatizada y más eficiente. Esta integración busca conectar la teoría con la práctica moderna, formando profesionales capaces de desenvolverse en entornos tecnológicos exigentes.

La estructura del libro está diseñada de forma progresiva, clara y didáctica, con ejemplos resueltos, actividades de aprendizaje y preguntas que invitan a la reflexión y a la aplicación del conocimiento en contextos reales. Más allá de memorizar fórmulas, se busca que el lector comprenda la lógica detrás de cada procedimiento, desarrolle pensamiento crítico y fortalezca su capacidad para tomar decisiones fundamentadas en datos y principios de la ingeniería.

Este libro también refleja una visión humanizada de la enseñanza de la ingeniería: una herramienta para transformar la realidad, aportar a la solución de problemas ambientales y sociales, y formar profesionales con conciencia técnica

y ética. Espero que esta obra sea una guía útil y motivadora, no solo para aprobar una asignatura, sino para inspirar una carrera comprometida con la innovación y el desarrollo sostenible.

Objetivos específicos del libro

Para alcanzar el propósito general, este libro se propone los siguientes objetivos específicos, los cuales se encuentran directamente vinculados con la organización de los capítulos:

1. Explicar los fundamentos del balance de materia y los conceptos esenciales de sistemas y procesos en ingeniería química, proporcionando la base conceptual necesaria para el estudio posterior – desarrollado en el Capítulo I: Introducción al balance de materia
2. Aplicar balances de materia a sistemas sin reacción química en estado estacionario y transitorio, fortaleciendo la capacidad de análisis en situaciones industriales reales – desarrollado en el Capítulo II: Balances de materia sin reacción química
3. Analizar balances de materia en sistemas con reacción química, considerando parámetros como la estequiometría, conversión, rendimiento y selectividad, esenciales para el diseño y control de procesos – desarrollado en el Capítulo III: Balances de materia con reacción química
4. Integrar herramientas computacionales como Microsoft Excel y MATLAB en la resolución de balances de materia, fomentando competencias digitales y aplicativas en la ingeniería química contemporánea – desarrollado en el Capítulo IV: Aplicaciones computacionales para la resolución de balances de materia con Microsoft Excel y MATLAB.

CAPÍTULO I: Introducción al Balance de Materia

Resumen

El balance de materia es una herramienta fundamental en la ingeniería química, ya que permite cuantificar la cantidad de materia que entra, sale, se genera, se consume o se acumula en un sistema. Este capítulo introduce los principios básicos de la conservación de la masa y su aplicación en procesos físicos y químicos, proporcionando el marco conceptual necesario para el análisis y diseño de operaciones industriales.

Se abordan definiciones clave como sistema, frontera, estado estacionario y transitorio, así como los tipos de procesos (por lotes, semicontinuo y continuo). Además, se familiariza al estudiante con la lectura de diagramas de flujo y la identificación de corrientes de entrada y salida, lo que constituye la base para resolver balances en sistemas reales.

Este primer acercamiento busca no solo enseñar conceptos teóricos, sino también despertar en el lector la comprensión de cómo los balances de materia están presentes en prácticamente todos los procesos de transformación industrial, desde la producción de alimentos hasta el tratamiento de aguas. El objetivo es que el estudiante reconozca el valor práctico de esta herramienta y se sienta motivado a aplicarla con criterio y lógica ingenieril.

Objetivos de aprendizaje:

- Comprender los principios fundamentales de la conservación de la masa y su aplicación en los diferentes sistemas físicos y químicos, como base para el desarrollo de balances de materia.
- Identificar y clasificar los diferentes tipos de sistemas (abierto, cerrado, y aislado) y procesos (continuo y por lotes) en los que se aplican balances de materia.

- Reconocer la importancia del balance de materia en la ingeniería de procesos, destacando su utilidad en el diseño, análisis y optimización de operaciones industriales.

Resultados de aprendizaje:

- El estudiante explica con claridad el principio de conservación de la masa y demuestra su aplicación en distintos tipos de sistemas físicos y químicos, utilizando ejemplos prácticos en el contexto de la ingeniería química.
- El estudiante identifica correctamente los tipos de sistemas (abierto, cerrado y aislado) y clasifica procesos como continuos, por lotes y semicontinuos, describiendo sus características y diferenciaciones en función de su comportamiento en los balances de materia.
- El estudiante argumenta la importancia del balance de materia como una herramienta esencial en el diseño, control y mejora de procesos industriales, relacionando su aplicación con casos reales en la industria química y afines.

1.1. Conceptos Fundamentales

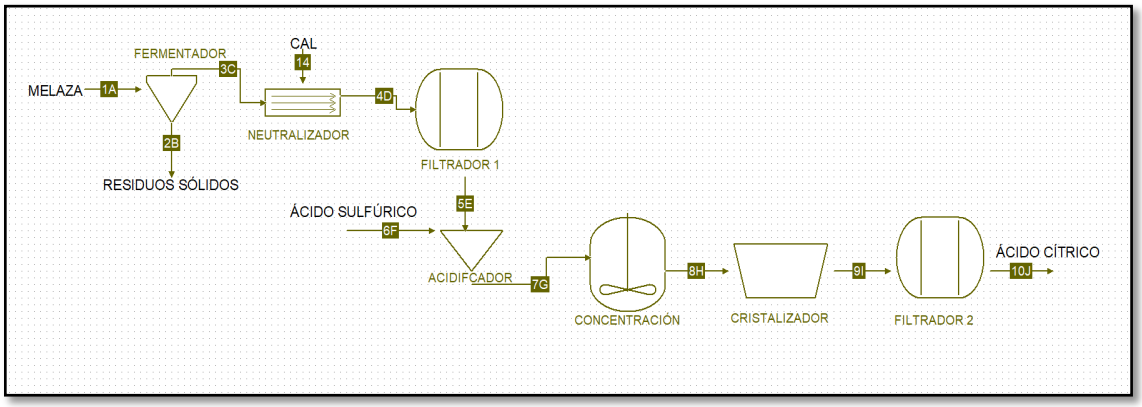
Los conceptos fundamentales en ingeniería química son esenciales para comprender y analizar los procesos de transformación de materia y energía. Estos conceptos forman la base para diseñar, operar y optimizar sistemas industriales que responden a las demandas tecnológicas y ambientales actuales (Monsalvo Vázquez, 2015).

1.1.1. Proceso y Tipos de Proceso. Un proceso puede definirse como una serie de operaciones interconectadas mediante las cuales se logra una transformación física, química o biológica de materiales iniciales para obtener productos deseados. Dependiendo de su operación, los procesos

se clasifican en continuos, por lotes y semicontinuos (Rojas González, 2012).

1.1.1.1. *Continuos.* En estos procesos, los flujos de materia y energía se mantienen constantes y sin interrupciones durante un periodo determinado. Son ideales para producciones a gran escala donde se busca eficiencia y uniformidad, en la figura 1 se puede ver una representación gráfica de un sistema continuo, para la producción de ácido cítrico.

Figura 1. *Producción continua de ácido cítrico*



Nota. Autoría propia, 2025.

El proceso tipo continuo se caracteriza por el empleo de poca mano de obra y no hay tiempos muertos de producción, a continuación, en la tabla 1, se describen las ventajas y desventajas que se tienen al emplear este tipo de proceso para las industrias.

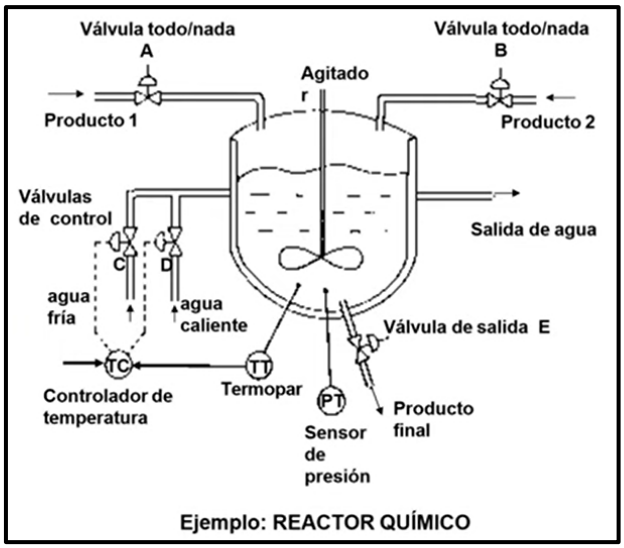
Tabla 1. Ventajas y desventajas del proceso continuo

Ventajas	**Desventajas**

Permiten la automatización del proceso.	Materia prima con una composición uniforme o que poco varíe.
Se producen mayores cantidades de producto.	Almacenamiento elevado de materia prima y de producto acabado.

1.1.1.2. *Por lotes.* Implican la transformación de una cantidad fija de material en ciclos definidos. Este enfoque es común en procesos farmacéuticos, alimentarios y químicos especializados, donde la flexibilidad y la adaptabilidad son prioritarias. Ejemplo: reactor químico, en la figura 2 se observa un reactor químico como ejemplo de un proceso por lotes.

Figura 2. *Esquema de un reactor químico representando un sistema de proceso por lotes.*



Nota. Elaborado por Universitat Politècnica de València - UPV, 2024.

Este tipo de procesos puede seguir la siguiente secuencia:

- ✓ Carga del material en el equipo.
- ✓ Preparación del material para su transformación (por ejemplo: mezclado, precalentamiento).
- ✓ La transformación propiamente dicha.
- ✓ Descarga del producto obtenido.
- ✓ Limpieza del equipo.

El proceso por lotes, también conocido como *batch* o discontinuo se caracteriza por el empleo de un elevado número de operarios y con tiempos muertos de producción, a continuación, en la tabla 2, se describen algunas ventajas y desventajas de este proceso.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de un proceso por lotes o *batch*

Ventajas	**Desventajas**
Mayor flexibilidad para la elaboración de diversos tipos de productos a distintas capacidades de producción.	Utilización de mayor espacio para su empleo.
Menores gastos de inversión en instalaciones.	Menor uniformidad del proceso.
Mayor sencillez del control del proceso de elaboración.	Mayores costos de mano de obra.

1.1.1.3. *Semicontinuos.* Combinan características de los procesos continuos y por lotes, permitiendo alternar entre diferentes condiciones operativas según las necesidades del proceso.

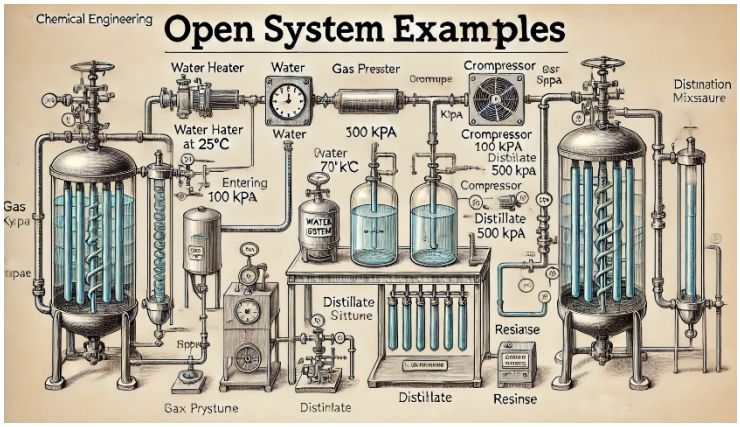
1.1.2. *Definición de Sistema y Límites del Sistema.* Un sistema se refiere a una región o conjunto de componentes físicos y químicos seleccionados para el análisis de sus interacciones y comportamiento. Los límites del sistema definen la frontera que separa al sistema de su entorno y determinan las

interacciones posibles en términos de transferencia de materia y energía. Esta definición es fundamental para modelar procesos industriales y permite identificar qué variables deben considerarse en el análisis.

1.1.2.1. Clasificación de sistemas: abiertos, cerrados y aislados.

- *Sistema abierto.* Permiten el intercambio de materia y energía con el entorno (Fito *et al.,* 2023). Por ejemplo, una columna de destilación intercambia vapor, líquido y calor con su entorno, tal como se observa en la figura 3.

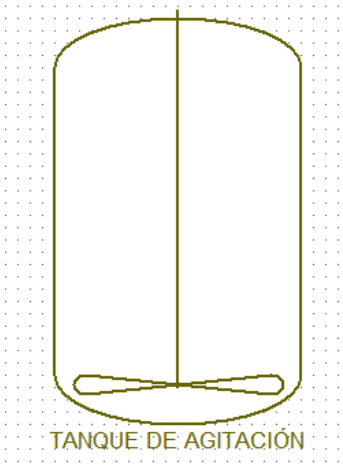
Figura 3. *Ejemplos de procesos de sistemas abiertos*



Nota. Elaboración propia, 2024, imagen de equipos recopilados de destilación y separación, los cuales son representados como sistemas abiertos dado el intercambio de materia y energía que presentan.

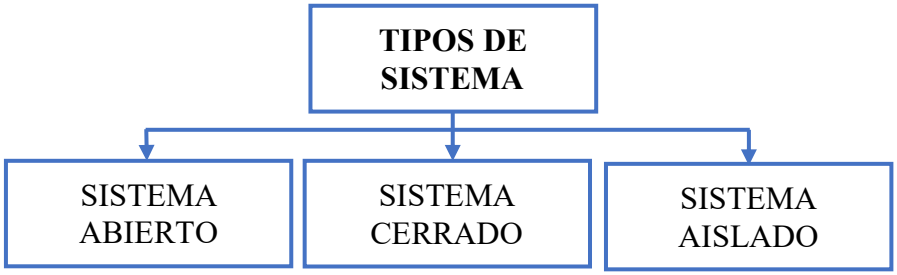
- *Sistema cerrado.* Solo permiten el intercambio de energía, pero no de materia, por lo que la masa total del sistema permanece constante. Un ejemplo común es un reactor de volumen constante que se observa en la figura 4, utilizado para estudios cinéticos.

Figura 4. Representación de un sistema cerrado a partir de un tanque de agitación de volumen fijo



Nota. Autoría propia, 2025.

- *Sistema aislado*. No hay intercambio de materia ni de energía con el entorno. Este tipo de sistema es idealizado, pero se asemeja a dispositivos como un termo perfectamente aislado. Ejemplo: un termo perfectamente sellado que mantiene constante su contenido.



1.1.3. Componentes clave: corrientes, propiedades intensivas y extensivas. En el análisis de cualquier sistema, es esencial identificar las corrientes que ingresan y salen del mismo, así como las propiedades que describen su estado. Las corrientes representan los flujos de materia o energía que cruzan los límites del sistema y determinan su interacción con el entorno. Las propiedades del sistema se clasifican en (Boyacá Mendivelso, 2019):

Intensivas. Aquellas que no dependen de la cantidad de materia presente, como la temperatura, la densidad o la presión. Estas propiedades son fundamentales para
describir el estado termodinámico del sistema.

Extensivas. Dependientes de la cantidad de materia, como la masa, el volumen o la energía total. Su valor absoluto puede variar con el tamaño del sistema, pero también se pueden normalizar para obtener propiedades intensivas equivalentes.

1.1.4. Estado estacionario y no estacionario. El estado operativo de un sistema puede clasificarse en estacionario o no estacionario, dependiendo de la variación temporal de sus propiedades. En un estado estacionario, las variables operativas, como temperatura, presión y flujo, permanecen constantes en el tiempo, aunque puedan variar espacialmente dentro del sistema. Esto es característico de procesos continuos en régimen estable, donde las condiciones son predecibles y se facilita el control del sistema (Galagovsky y Giudice, 2015).

Por otro lado, en un estado no estacionario, las variables cambian con el tiempo, lo que refleja transiciones, ajustes o eventos dinámicos como el arranque o apagado de equipos. Este estado es común en procesos de lote o durante perturbaciones temporales en sistemas continuos. La comprensión de estos conceptos permite modelar y predecir el comportamiento de sistemas complejos en condiciones reales.

Los balances de materia constituyen una de las herramientas fundamentales en la ingeniería química. Representan un enfoque sistemático para analizar y resolver problemas relacionados con la transformación y el manejo

de materiales en procesos industriales, proporcionando la base para diseñar, optimizar y operar equipos y sistemas químicos (Nandagopal, 2023).

¿Qué es un balance de materia?

Un balance de materia es un cálculo cuantitativo que permite determinar la distribución de materiales en un sistema o proceso. Este análisis implica relacionar las cantidades de materia que entran, salen, se generan, se consumen y se acumulan en un sistema definido (Garavito, 2007). Dependiendo del tipo de sistema y sus condiciones, los balances de materia pueden clasificarse en:

1.1.4.1. *Balance en estado estacionario.* No hay acumulación de materia en el sistema. Este tipo de balance se aplica a procesos que han alcanzado un estado de equilibrio en el que las condiciones no cambian con el tiempo. Ejemplos comunes incluyen sistemas de flujo continuo como intercambiadores de calor y torres de destilación en funcionamiento estable.

1.1.4.3. *Balance en estado transitorio.* Existe acumulación de materia debido a cambios temporales en el sistema. Estos balances son fundamentales para analizar procesos durante periodos de arranque, apagado o cualquier situación en la que las condiciones del sistema varíen con el tiempo. Un ejemplo sería un reactor por lotes en el que la concentración de reactivos y productos cambia continuamente.

Los balances de materia son esenciales para el diseño y operación eficiente de procesos industriales. Algunas razones clave incluyen:

- *Diseño de procesos.* Permiten dimensionar equipos como reactores, columnas de destilación y unidades de separación.

- *Control y optimización.* Ayudan a identificar cuellos de botella y oportunidades para mejorar la eficiencia del proceso.
- *Análisis económico.* Facilitan la estimación de costos al determinar las cantidades requeridas de materias primas y productos.
- *Cumplimiento normativo.* Contribuyen a evaluar el impacto ambiental de un proceso, asegurando que se cumplan los límites de emisiones y descargas.

1.1.5. Principios básicos de conservación de la masa. El principio fundamental que rige los balances de materia es la conservación de la masa, que establece que la masa no puede crearse ni destruirse, solo transformarse. Este principio se aplica tanto para sistemas abiertos como cerrados. El principio de conservación de la masa también se extiende a cada componente individual de una mezcla. En un sistema multicomponente, se puede realizar un balance para cada especie química, considerando las reacciones químicas involucradas (Maroto Valiente, Á. y Muñoz Andrés, 2013).

En un sistema de mezcla de dos corrientes con composiciones diferentes, el balance de materia permite calcular la concentración resultante en el flujo combinado. El dominio de estos conceptos proporciona a los ingenieros químicos las herramientas necesarias para abordar y resolver problemas complejos en una amplia gama de aplicaciones industriales.

1.1.6. Ecuación general de materia.-.El balance de una cantidad conservada, como la masa total, la masa de una especie específica, la energía o el momento, se aplica a un sistema definido, que puede ser una única unidad de proceso, un conjunto de unidades o un proceso completo (Garavito, 2007). La ecuación general de balance de materia sintetiza las diferentes

contribuciones al cambio de materia en un sistema (1) (Zapata y Artbox, 2012):

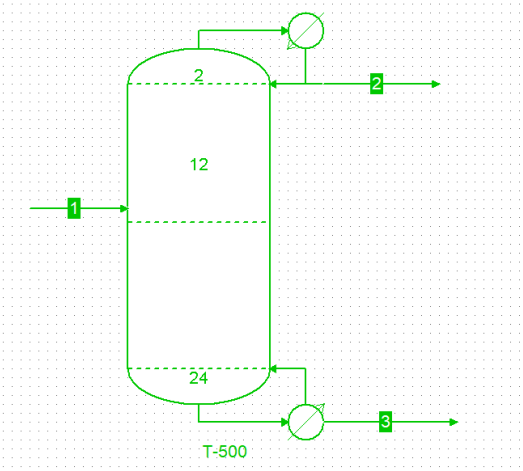
$$[E] + [G] - [S] - [C] = [A] \quad (1)$$

Donde:

Las variables [E] representa a la masa de entrada (entra a través de las fronteras del sistema), [G] es la generación (la cual se produce en el interior del sistema), [S] es la masa a la salida del sistema (sale a través de las fronteras del sistema), [C] corresponde al consumo (masa que se consume en el interior del sistema) y [A] es la acumulación (masa acumulada en el interior del sistema, es decir, que refleja el cambio neto de materia en su interior). Esta ecuación puede aplicarse a sistemas de estado estacionario o transitorio, con o sin reacciones químicas, y es fundamental para el análisis de cualquier proceso industrial. Algunos ejemplos de aplicación a nivel industrial incluyen:

- *Industria petroquímica.*. Balance en una torre de destilación para determinar las fracciones de productos como gasolina, queroseno y gasóleo, tal como se puede observar en la figura 5.
- *Tratamiento de aguas.* Balance para calcular las tasas de entrada y salida de contaminantes en una planta de tratamiento.
- *Fabricación de alimentos.* Balance en un proceso de evaporación para concentrar jugos o soluciones de azúcar.

Figura 5. *Balance de destilación fraccionada del benceno, tolueno y o – xileno.*



Stream	1	2	3	Unit
Pressure	1	1	1	bar
Temperature	102.983	79.4411	123.081	°C
Flow rate	3000	989.796	2010.2	kmol / s
Mole frac Benzene	0.333333	0.99	0.01	
Mole frac Toluene	0.333333	0.01	0.492538	
Mole frac O-xylene	0.333333	6.45448e-08	0.497462	

Nota. Elaboración propia, 2025.

1.1.7. Grados de libertad. Los grados de libertad se refiere al número de variables independientes que deben especificarse para resolver un sistema de ecuaciones en un problema de balance de materia. Esto permitirá conocer si el sistema a resolver cuenta con una única solución o varias soluciones como se puede referenciar en la tabla 3, describiéndose como definido, sub determinado o sobre determinado, a partir de las ecuaciones que rigen al sistema y las variables que lo describen. Representan, el número de variables desconocidas que se deben especificar luego de considerar todas las ecuaciones independientes disponibles en el sistema. En términos formales se calculan empleando la ecuación 2 (Felder y Rousseau, 2003):

$$Gl = n_{incógnitas} - n_{ecuaciones\ independientes} \tag{2}$$

En donde:

Gl: Grados de libertad.

$n_{incógnitas}$: Número de variables independientes.

$n_{ecuaciones\ independientes}$: Número de ecuaciones independientes.

Tabla 3. Tipos de sistema según los grados de libertad

Grados de libertad	Descripción	Detalle
= 0	El sistema está definido.	Única solución
> 0	Sistema sub determinado.	Falta que se especifiquen datos en las variables.
< 0	Sistema sobre determinado.	Hay más ecuaciones que incógnitas, pueden existir inconsistencias o redundancias. Se puede considerar para casos de optimización porque existe más de una única solución.

Un análisis de grados de libertad permitirá conocer en las subunidades de un proceso global por donde iniciar a resolver el problema, dado que se podrá identificar la subunidad que se encuentre definida, sirviendo de guía para continuar a resolver el resto de las corrientes de cada unidad de estudio.

1.1.8 Procedimiento y/o protocolo para resolver ejercicios de balance de materia en procesos químicos.

- *Definir el sistema.* Dibujar un diagrama de flujo del proceso y delimitar los límites del sistema. Es fundamental organizar los datos de manera conveniente para efectuar los cálculos subsecuentes. Lo más recomendable es dibujar el diagrama de flujo del proceso, usando recuadros u otros símbolos para representar las unidades de proceso (reactores, mezcladores, unidades de separación, entre otros) y líneas con flechas para representar la dirección de las corrientes de entradas y salidas en el sistema analizado.
- *Identificar las corrientes.* Etiquetar todas las entradas, salidas y flujos internos con sus composiciones y cantidades.
- *Establecer bases de cálculo.* Elegir una unidad de tiempo o masa para realizar los cálculos.
- *Plantear ecuaciones.* Aplicar la ecuación general de balance de materia a cada componente y al sistema global.
- *Resolver el sistema.* Determinar los valores de las variables desconocidas usando las ecuaciones planteadas.
- *Verificar resultados.* Comprobar que se cumple la conservación de la masa y que los resultados son coherentes con el proceso dadas sus consideraciones de diseño.

1.1.9. Ejemplos de aplicación a nivel industrial de balances de materia.

Ejercicio 1. Biorrefinería (aprovechamiento integral de biomasa):

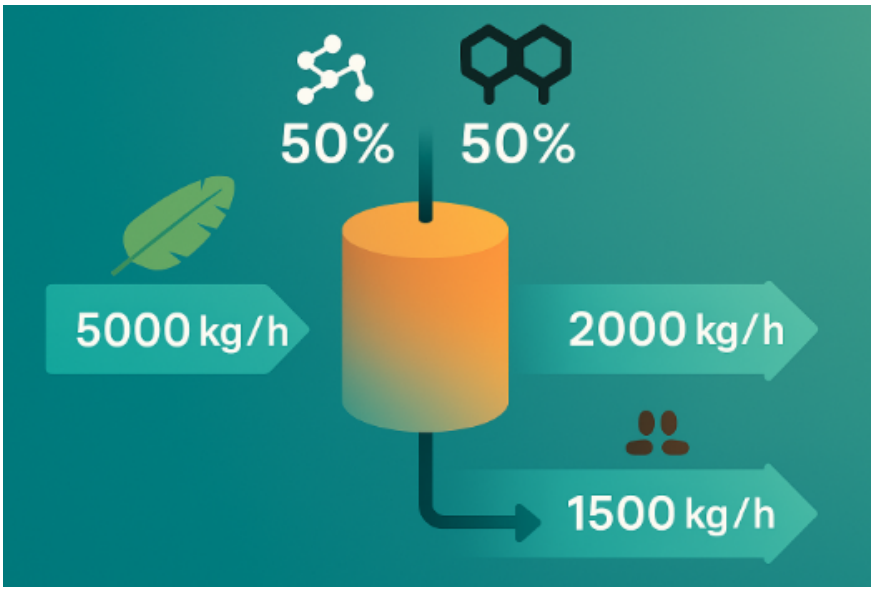
Dato curioso: La biorrefinería se define como un sistema de procesamiento industrial que permite el aprovechamiento integral de la biomasa para obtener, a partir de una misma materia prima, una amplia gama de productos como energía, biocombustibles, químicos de alto valor y materiales biodegradables. Su principio se basa en la conversión sostenible de recursos renovables, tales como residuos agrícolas, forestales o agroindustriales, mediante

procesos físicos, químicos y biotecnológicos, con el fin de maximizar el rendimiento y minimizar la generación de desechos.

Lo innovador de la biorrefinería es que rompe con el enfoque lineal de producción al aplicar una lógica similar a la de las refinerías de petróleo, pero con materias primas renovables y limpias. Actualmente, este concepto se potencia con tecnologías de vanguardia como la hidrólisis enzimática, la fermentación avanzada, la catálisis verde y la nanotecnología, que permiten valorizar fracciones de la biomasa antes consideradas desechos. Así, la biorrefinería se convierte en un modelo contemporáneo alineado con la economía circular y la bioeconomía, consolidándose como una herramienta clave en la transición hacia procesos industriales más sostenibles y responsables con el medio ambiente.

Planteamiento del ejercicio: En una etapa de pretratamiento/hidrólisis se separan cada hora, en dos corrientes, 5000 kg/h de biomasa lignocelulósica de banano compuesta por azúcares fermentables (S) y lignina (L), con 50% de azucares fermentables en masa (base seca). La corriente superior (líquida) contiene 2000 kg s/h y la corriente inferior (sólida) contiene 1500 kg L/h. El proceso está en estado estacionario. Escriba los balances de S y L y calcule los flujos desconocidos de S en la corriente inferior y de L en la corriente superior. En la figura 6, se tiene una diagramación del enunciado del ejercicio.

Figura 6. *Representación esquemática del problema con sus datos iniciales.*



Nota. Elaboración propia, 2025.

SOLUCIÓN:

Análisis de grados de libertad:

Variables independientes	**Pretratamiento/Hidrólisis**
F, xS_F, S, xSs, L, xL_I.	6
Ecuaciones independientes	
Balances independientes: Balance General de masa en Pretratamiento/hidrólisis, Balance específico de azúcares fermentables.	-2
Divisiones especificadas: xS_F, xL_F, Flujo de lignina en C.I, Flujo de azúcares fermentables en C.S.	-4
Grados de Libertad	0

Resultado:

El resultado de los grados de libertad indica que el sistema tiene una finita solución y que los datos proporcionados son suficientes para resolver el balance del destilador.

Balance general de masa:

$$F = C.S + C.I$$

Balance específico de Azúcares fermentables:

$$F(xS_F) = C.S(xS_{C.S}) + C.I(xS_{C.I})$$

Reemplazando datos:

$$5000\frac{Kg}{H}(0.5) = 2000\frac{Kg}{H}(1.0) + C.I(xS_I)$$

Despejando, la cantidad de azúcares fermentables en la corriente inferior:

$$C.I(xS_{C.I}) = 2500\frac{Kg}{H} - 2000\frac{Kg}{H}$$

$$\mathbf{C.I(xS_{C.I}) = 500\frac{Kg}{H}}$$

Por tanto, la corriente inferior (C.I):

$$C.I = C.I(xS_{C.I}) + C.I(xL_{C.I})$$

$$C.I = 500\frac{Kg}{H} + 1500\frac{Kg}{H}$$

$$C.I = \mathbf{2000\frac{Kg}{H}}$$

La corriente superior (C.S):

$$C.S = F - C.I$$

$$C.S = 5000\frac{Kg}{H} - 2000\frac{Kg}{H}$$

$$\boldsymbol{C.S = 3000\,\frac{Kg}{H}}$$

Flujo de azúcares fermentables en la corriente superior:

$$C.S(xL_{C.S}) = C.S - C.S(xS_{C.S})$$

$$C.S(xL_{C.S}) = 3000\,\frac{Kg}{H} - 2000\,\frac{Kg}{H}$$

$$\mathbf{C.S(xL_{C.S}) = 1000\,\frac{Kg}{H}}$$

Composiciones en Corriente inferior C.I:

Azúcares fermentables (S):

$$C.I = C.I(xS_{C.I}) + C.I(xL_{C.I})$$

$$(xS_{C.I}) = \frac{C.I - C.I(xL_{C.I})}{C.I}$$

$$(xS_{C.I}) = \frac{2000\,\frac{Kg}{H} - 1500\,\frac{Kg}{H}}{2000\,\frac{Kg}{H}}$$

$$\mathbf{(xS_{C.I}) = 0.25}$$

Lignina:

$$(xL_{C.I}) = 1 - (xS_{C.I})$$

$$(xL_{C.I}) = 1 - 0.25$$

$$\mathbf{(xL_{C.I}) = 0.75}$$

Composiciones en Corriente Superior C.S:

Azúcares fermentables:

$$C.S = C.S(xS_{C.S}) + C.S(xL_{C.S})$$

$$(xS_{C.S}) = \frac{C.S - C.S(xL_{C.S})}{C.S}$$

$$(xS_{C.S}) = \frac{3000\,\frac{Kg}{H} - 1000\,\frac{Kg}{H}}{3000\,\frac{Kg}{H}}$$

$$(\mathbf{xS_{C.S}}) = \mathbf{0.6667}$$

Lignina:

$$(\mathrm{xL_{C.S}}) = 1 - (\mathrm{xS_{C.S}})$$

$$(\mathrm{xL_{C.S}}) = 1 - 0.6667$$

$$(\mathbf{xL_{C.S}}) = \mathbf{0.3333}$$

Comprobación:

Azúcares fermentables en corriente superior

$$2000\,\frac{\mathrm{Kg}}{\mathrm{H}} = \mathrm{C.S}(\mathbf{xS_{C.S}})$$

$$2000\,\frac{\mathrm{Kg}}{\mathrm{H}} = 3000\,\frac{\mathrm{Kg}}{\mathrm{H}}(0.6667)$$

$$\mathbf{2000\,\frac{Kg}{H} = 2000\,\frac{Kg}{H}}$$

Lignina en corriente inferior

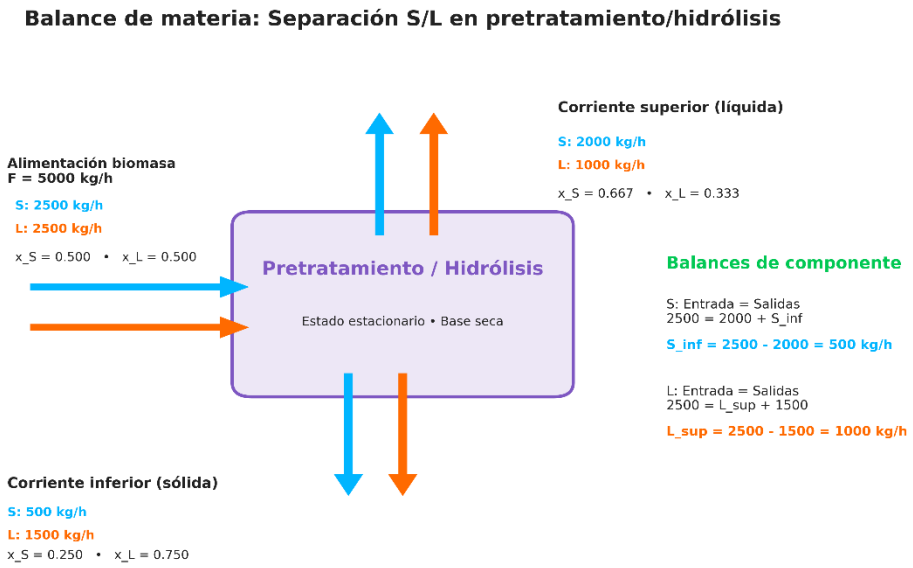
$$1500\,\frac{\mathrm{Kg}}{\mathrm{H}} = \mathrm{L}(\mathrm{xL_{C.I}})$$

$$1500\,\frac{\mathrm{Kg}}{\mathrm{H}} = 2000\,\frac{\mathrm{Kg}}{\mathrm{H}}(0.75)$$

$$\mathbf{1500\,\frac{Kg}{H} = 1500\,\frac{Kg}{H}}$$

En la figura 7, se presenta un diagrama de los resultados que se obtuvieron del ejercicio 1, la cual contiene los flujos másicos y las composiciones en cada corriente.

Figura 7. *Representación esquemática del ejercicio con los resultados obtenidos*



Nota. Elaboración propia, 2025.

En la actualidad, los balances de materia también desempeñan un papel esencial en procesos emergentes. Por ejemplo, en el diseño de biorefinerías se aplican balances para cuantificar el aprovechamiento integral de biomasa y reducir residuos. De manera similar, en la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis, los balances permiten dimensionar consumos de agua y energía, asegurando eficiencia y sostenibilidad. Estos casos ilustran cómo los principios tradicionales siguen siendo la base para resolver desafíos contemporáneos en la transición energética y en la economía circular.

Actividad de Aprendizaje:

Objetivo: Evaluar la comprensión de los principios fundamentales del balance de materia sin reacción química, mediante la aplicación en un caso práctico, el análisis de conceptos clave y la reflexión crítica sobre su importancia en la ingeniería de procesos.

Instrucciones:

Lee cuidadosamente las preguntas y responde con base en lo aprendido en el capítulo. Puedes elegir un proceso real o simulado (como el llenado de un tanque, la mezcla de soluciones, o una operación básica en la industria) para contextualizar algunas respuestas.

Parte A. Fundamentos y clasificación de sistemas (preguntas teóricas)

1. ¿En qué consiste el principio de conservación de la masa y por qué es fundamental para la ingeniería química?
2. Define con tus propias palabras qué es un sistema abierto, cerrado y aislado, y da un ejemplo real de cada uno.
3. ¿Cómo se diferencian los procesos continuos de los procesos por lotes? Menciona un ejemplo de cada tipo.
4. ¿Qué elementos debe contener un diagrama de flujo de proceso bien estructurado?
5. ¿Qué información necesitas conocer antes de plantear un balance de materia en un sistema?

Parte B. Aplicación práctica (análisis de un proceso real o simulado)

Selecciona un proceso sencillo (como el llenado de un tanque, la preparación de una mezcla líquida o un proceso de bombeo continuo) y responde:

6. Describe brevemente el proceso seleccionado. ¿Qué corrientes de entrada y salida existen?
7. ¿Cómo clasificarías el sistema (abierto, cerrado o aislado) y el proceso (continuo o por lotes)? Justifica tu respuesta.
8. Elabora un esquema o diagrama de flujo simplificado del proceso. Señala entradas, salidas y acumulación (si aplica).

9. Plantea el balance de materia global en estado estacionario para tu proceso. Si no es posible asumir estado estacionario, explica por qué.
10. ¿Qué desafíos podrías encontrar al aplicar balances de materia en procesos reales en la industria? ¿Cómo los enfrentarías como ingeniero/a químico/a?

Parte C. Reflexión final

11. En tus palabras, ¿cómo se relaciona el conocimiento de los balances de materia con el diseño de procesos sostenibles y eficientes?
12. ¿Qué habilidades consideras que desarrollas al aprender a hacer balances de materia y cómo podrías aplicarlas en tu futuro profesional?

Sugerencia docente: Puedes evaluar esta actividad con una rúbrica sencilla basada en: comprensión conceptual, aplicación correcta, claridad del diagrama y profundidad en la reflexión.

Cierre y Conexión:

El capítulo I asentó el principio de conservación de la masa, definió con precisión sistema y frontera, estableció bases de cálculo y criterios de unidades y, dejó un procedimiento paso a paso para redactar balances globales y por componente en régimen estacionario y no estacionario con verificación de grados de libertad y coherencia numérica.

En el capítulo II trasladaremos este andamiaje a operaciones sin reacción química como mezcla, separación y dilución, afinando la lectura de diagramas de proceso y la organización de datos de entrada para que el método se vuelva rutinario y confiable en problemas reales.

Como aplicación directa podrás auditar pérdidas de materia en líneas de agua y aire de planta, estimar emisiones fugitivas y detectar inconsistencias de inventario y en contextos de bioprocesos, podrás contrastar consumos medidos con los que exige la estequiometría de crecimiento celular para diagnosticar desbalances.

Referencias bibliográficas:

Boyacá Mendivelso, L. A. (2019). *Balance de materia orientado a procesos* ((ed.). Ed). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/189655

Chen, C.-T. (2022). *MATLAB Applications in Chemical Engineering*. Chyi-Tsong Chen. https://books.google.com/books?id=kpxwEAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=MATLAB+Applications+in+Chemical+Engineering&hl=es&newbks=1&newbks_redir=1&sa=X&ved=2ahUKEwiMxrn5v8mPAxWMRzABHWMNJxkQ6AF6BAgNEAM

Clough, D. E. (2016). Use Spreadsheets for excel para ingenieria quimica. *Chemical Engineering Progress*, *August*, 25–34. https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20160825_0.pdf

Dhagat, S., Jujjavarapu, S. E., Kumar, N. S. S., & Mahapatra, C. (2024). *Recent Advances in Bioprocess Engineering and Bioreactor Design*. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-97-1451-3

Felder, Richard; Rousseau, R. (2003). *Principios elementales de los procesos químicos* (Limusa Wil). https://hdquimicaeiqtotalh.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/10/libro-de-balance-felder.pdf

Fito Suñer, P. J. Castelló Gómez, M. L. & Tarrazó Morell, J. (2023). *Balances de materia y energía en ingeniería de bioprocesos: (2 ed.)* (Editorial).

https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/238439

Galagovsky, L., & Giudice, J. (2015). Estequiometría y ley de conservación de la masa: una relación a analizar desde la perspectiva de los lenguajes químicos. *Ciência & Educação (Bauru)*, *21*(1), 85–99. https://doi.org/10.1590/1516-731320150010006

Gallego, M. (2019). *Excel 2019: avanzado: (1 ed.).* (RA-MA Edit). https://books.google.com.ec/books?id=78y4EAAAQBAJ&pg=PT4&dq=Excel+2019:+avanzado:+(1+ed.).&hl=es&newbks=1&newbks_redir=1&sa=X&ved=2ahUKEwi_7tfBwMmPAxW1RjABHWi2GF0Q6AF6BAgNEAM

Garavito, N. G. (2007). *Balance De Materia Libro Guía De Clase*. 1–3. https://www.academia.edu/36750523/BALANCE_DE_MATERIA_LIBRO_GUÍA_DE_CLASE_NÉSTOR_GOODING_GARAVITO

Himmelblau, D. M. (1997). *Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química* (PRENTICE-H). https://celqusb.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/01/principios-bc3a1sicos-y-cc3a1lculos-e-ingenieria-quc3admica-himmelblau-6ed.pdf

Maroto Valiente, Á. & Muñoz Andrés, V. (2013). *Operaciones unitarias y reactores químicos* (UNED-Uni). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/48624

Martín, M. M. (2025). *Introduction to software for chemical engineers*. CRC Press. https://books.google.com.ec/books?id=MlpEEQAAQBAJ&pg=PT607&dq=Introduction+to+software+for+chemical+engineers&hl=es&newbks=1&newbks_redir=1&sa=X&ved=2ahUKEwjAw8yKwMmPAxWWRjABHQ0WNnkQ6AF6BAgNEAM

Matlab, L. (2021). MATLAB & Simulink. *Retrieved September*. https://www.mathworks.com/products/matlab.html

Monsalvo Vázquez, R. & M. del R. R. S. (2015). *Balance de materia y energía: procesos industriales* (Editorial). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/39426

Nandagopal, N. S. (2023). *Chemical engineering principles and applications*. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-27879-2

Rojas González, A. F. (2012). *Fundamentos de procesos químicos* (Universida). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/127951

Rosas-Martínez, J. M., Valero-Romero, M. J., García-Mateos, F. J., Ruiz-Rosas, R. R., Rodríguez-Mirasol, J., & Cordero-Alcántara, T. (2022). Resolución de problemas modelo de Ingeniería Química usando MATLAB. *VI Congreso de Innovación Docente En Ingeniería Química*. https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/24752/T3_Poster_Flash_Rosas.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Zapata, A., & Artbox, E. (2012). BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA. Formulación, solución y usos en Procesos Industriales. In *BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA. Formulación, solución y usos en Procesos Industriales. Corregida y aumentada*. https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/46c24dcb-d457-41eb-83eb-01da1ff62489/content

CAPÍTULO II. Balances de Materia Sin Reacción Química

Resumen

Este capítulo aborda los fundamentos de los balances de materia en sistemas donde no ocurren reacciones químicas, una herramienta esencial en la ingeniería química para describir y optimizar procesos industriales. Se parte del principio de conservación de la masa, el cual establece que la masa no se crea ni se destruye, sino que se conserva a lo largo del tiempo. Con base en este principio, se desarrollan metodologías para establecer ecuaciones que representen la entrada, salida y acumulación de materia en diferentes unidades de proceso, ya sea en estado estacionario o transitorio.

El análisis se centra en identificar y clasificar correctamente los componentes de los sistemas físicos (abiertos, cerrados o aislados), así como los tipos de operación (procesos continuos o por lotes). Además, se enfatiza la importancia de realizar diagramas de flujo claros y detallados, ya que son herramientas clave para visualizar y organizar la información antes de aplicar los balances. El capítulo proporciona ejemplos prácticos en donde se aplica el balance global y el balance por componentes, permitiendo a los estudiantes desarrollar habilidades para resolver problemas reales con una base estructurada.

Se fomenta una comprensión integral del rol que desempeñan estos balances en el diseño y control de procesos, destacando su aplicabilidad en operaciones como mezclado, separación, dilución y concentración. El enfoque técnico, pero humanizado, busca que el estudiante no solo domine las fórmulas, sino que comprenda su utilidad para crear soluciones eficientes, sostenibles y seguras en su entorno profesional.

Objetivos de aprendizaje

- Comprender los principios fundamentales del balance de materia en sistemas sin reacción química.
- Identificar los diferentes tipos de procesos en los que no intervienen reacciones químicas, tales como mezclas, separaciones y cambios de fase.
- Aplicar los fundamentos teóricos de los balances de materia sin reacción químicos a sistemas abiertos y cerrados en estado estacionario para la resolución de ejercicios prácticos utilizando análisis pensamiento crítico.

Resultados de aprendizaje

- El estudiante explica los conceptos clave del balance de materia, incluyendo entrada, salida, acumulación y proceso estacionario/no estacionario, aplicándolos a situaciones industriales básicas.
- El estudiante clasifica correctamente diversos procesos unitarios (como destilación, evaporación, filtración) según el tipo de operación sin reacción, y representa sus esquemas de flujo correspondientes.
- El estudiante resuelve ejercicios cuantitativos de balance de materia en estado estacionario sin reacción química, determinando correctamente flujos másicos o fraccionales en sistemas simples y compuestos.

2.1. Sistemas de una sola unidad: conceptos básicos. La resolución de balances de materia sin reacción química radica principalmente en el conocimiento del principio de conservación de la materia. Además, independientemente si este es estacionario o transitorio, no ocurrirán reacciones químicas dentro del análisis del proceso. Por lo que la cantidad en masa en las corrientes de entrada es igual a la cantidad de masa en las salidas, dado que no existen reacciones químicas en las especies participantes que permitan definir la generación y consumo de especies químicas (Fito *et al.,* 2023).

$$Entrada - Salida + Generación - Consumo = Acumulación$$
$$Entrada + Generación - Salida - Consumo = 0$$

Para balances sin reacción química:

$$Entrada = Salida$$

2.2. Sistemas de múltiples unidades: enfoques de resolución secuencial. El procedimiento secuencial planteado en la sección (1.2.6) tiene un enfoque general, por lo que simplemente se debe considerar al momento de realizar los balances independientes que estos se clasifiquen de acuerdo con cada unidad de proceso, antecedido del balance general de todo el sistema en estudio. Por lo que una delimitación de fronteras de sistema será de ayuda para realizar esta organización en recirculación, derivación y purgado (Felder y Rousseau, 2003).

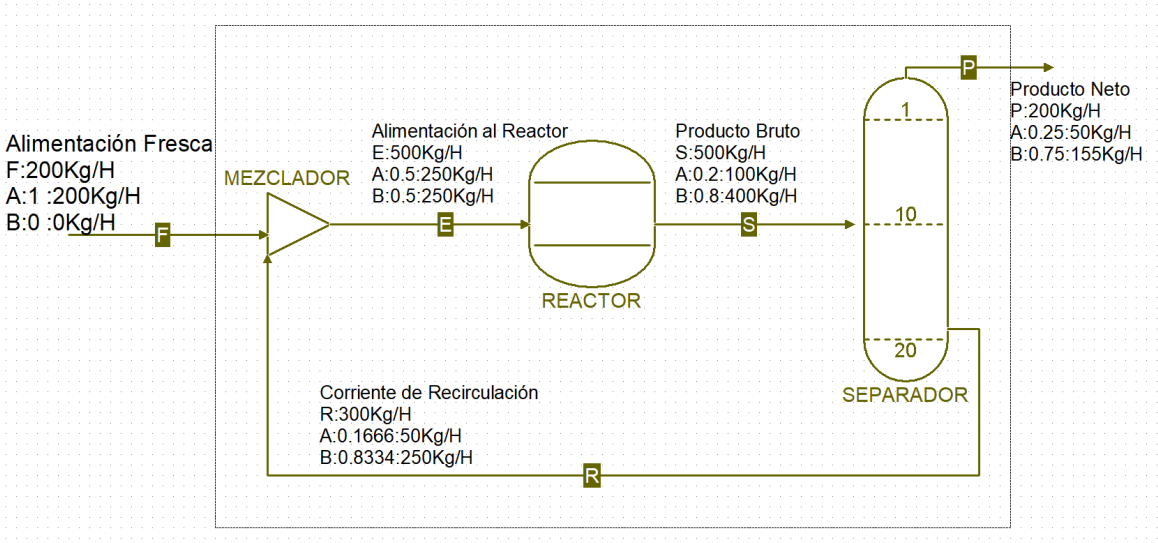
2.2.1. *Recirculación.* Generalmente en todo proceso de transformación química, en las corrientes de producto deseado no siempre se obtiene únicamente el componente de interés aislado, como se ve en la figura 8, por lo que, se puede desperdiciar indeseablemente parte de los reactivos que ingresan al proceso. De manera paralela ocurre con la energía, en donde se puede liberar calor en una de las líneas del proceso que se podría utilizarse en otras etapas (Himmelblau, 1997).

Dada esta situación en donde se necesita aprovechar parte de los recursos resultantes en las líneas de proceso, la recirculación resulta una práctica de interés. Por ello, para el diseño de las líneas de producción y cálculo de caudales en los sistemas unitarios o múltiples, se debe tener en cuenta los siguientes conceptos:

- *Alimentación fresca.* Es la corriente que ingresa a los reactivos por primera vez al proceso. También es conocida como alimentación nueva.

- *Alimentación al reactor.* Es la suma de la alimentación fresca con las corrientes recirculadas. Por lo general, se encuentra después de un punto de mezclado en los diagramas de flujo.
- *Producto bruto.* Es el resultado del proceso dentro del reactor de conversión u operación unitaria. Por lo general, este contiene parte de los reactivos que se van a recuperar.
- *Producto neto.* Es el producto refinado, cuya composición de reactivo de interés es prácticamente pura, en esencia representa al producto final de interés. Puede ser de igual composición que la corriente de reciclaje.

Figura 8. *Representación de un proceso de recirculación*



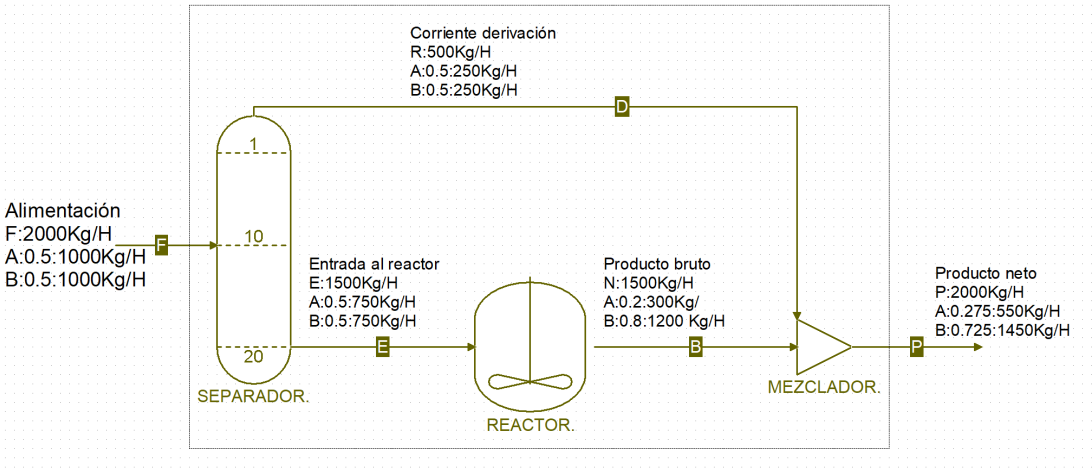
Nota. Elaboración propia, 2025, la imagen muestra un proceso de recirculación del componente "A", el cual puede aprovecharse al ser un componente de salid en el reactor.

Es importante considerar que, en sistemas de balances estacionarios, se conserva el criterio de nula acumulación. Es decir que no quedará materia acumulada temporalmente en el reactor o en otros subprocesos.

Mientras que, para balances con reacción química, se debe considerar las ecuaciones de los balances de cada subunidad de proceso y expresarlos en términos que lleguen a una sola variable, en función a las reacciones químicas y conversiones fraccionales correspondientes.

2.2.2. *Derivación*. La derivación o proceso de *bypass*, se diferencia de la recirculación debido a que su objetivo principal es la variación en las características y composiciones del producto de las líneas de salida a partir de la desviación de una parte del flujo que se alimenta al proceso como se observa en la figura 9. Por lo que, la composición de la corriente de alimentación será la misma que la corriente de derivación (Himmelblau, 1997).

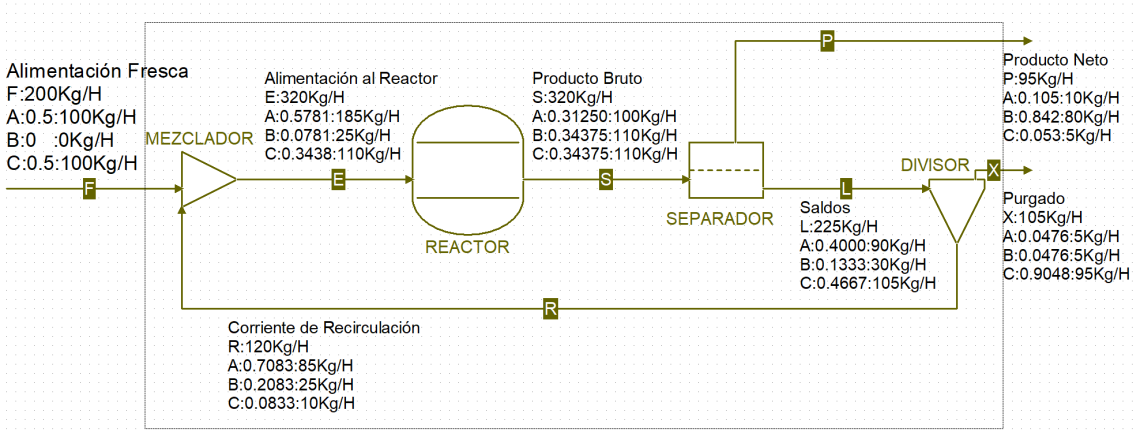
Figura 9. *Representación de un proceso de derivación*



Nota. Elaboración propia, 2025, la imagen representa un proceso de derivación del componente "B" a partir del separador, cuyo origen proviene de la corriente de alimentación "F", con el objetivo de obtener una producción alta de este componente en la corriente "P".

2.2.3. *Purgado*. Es aquel flujo que se desea tratar para disminuir o eliminar sustancias indeseadas que no se requieren para ser recirculadas al proceso (ver figura 10), por lo que llegan a ser indeseables si se las reincorpora a las líneas del proceso (Boyacá Mendivelso, 2019).

Figura 10. *Representación de un proceso de purgado*



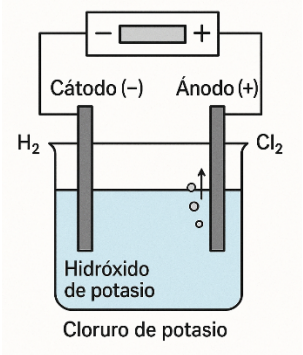
Nota. Elaboración propia, 2025, la imagen representa un proceso de purgado del componente "C" a partir del divisor, con el objetivo de obtener un producto concentración ínfima de este componente en la corriente "P" y un recirculado casi libre de este componente en "R". El componente "C" es purgado en la corriente "X".

2.3. ***Ejercicios de aplicación de balance de materia sin reacción química.***

Ejercicio 2: Producción de KOH

Dato curioso: La producción de hidróxido de potasio (KOH) se realiza principalmente a través de la electrólisis de soluciones acuosas de cloruro de potasio (KCl). En este proceso, el KCl se disuelve en agua para formar una salmuera que, al ser sometida a corriente eléctrica en una celda electrolítica (como se observa en la figura 11), se descompone en tres productos: hidróxido de potasio (en el cátodo), cloro gaseoso (en el ánodo) e hidrógeno gaseoso. Este método es análogo al proceso cloro-álcali usado para la obtención de NaOH, pero empleando sales potásicas como materia prima.

Figura 11. *Representación esquemática de una celda electrolítica.*

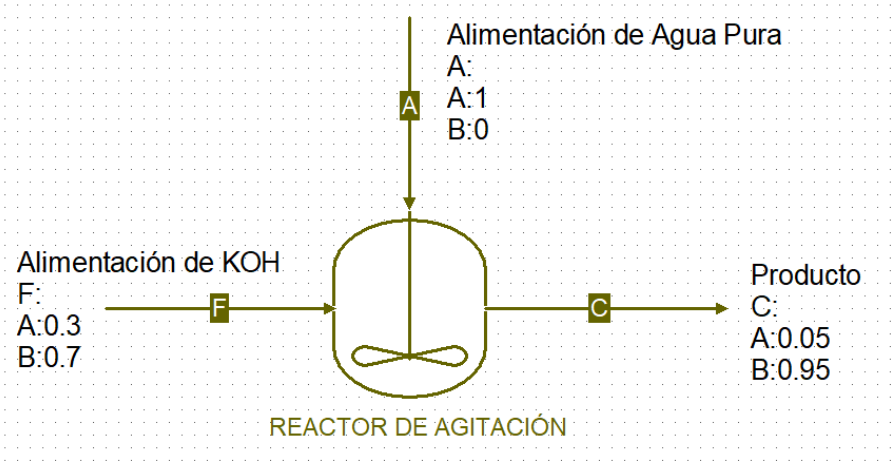


Nota. Elaboración propia, 2025.

La innovación y actualidad en la producción de KOH radica en la implementación de tecnologías de electrólisis más eficientes y sostenibles, como las celdas de membrana en lugar de las de diafragma o mercurio, reduciendo así el impacto ambiental y el consumo energético. Además, el interés contemporáneo en el KOH se relaciona con su uso estratégico en baterías alcalinas, producción de biodiésel, síntesis de fertilizantes líquidos y aplicaciones en energías renovables. De esta manera, la producción de KOH no solo representa un proceso químico clásico de la ingeniería, sino también un campo en evolución hacia mayor eficiencia y sostenibilidad.

Planteamiento del ejercicio: Una solución acuosa de hidróxido de potasio contiene 30.0% de KOH por masa. Se desea producir una solución de KOH al 5.0% diluyendo la corriente de la solución al 30% con una corriente de agua pura. Calcule las proporciones de litros H_2O/Kg solución de alimentación. En la figura 12, se observa una representación con los datos proporcionados del presente ejercicio.

Figura 12. *Representación esquemática del problema con sus datos iniciales.*



Nota. Elaboración propia, 2025.

Resolución:

Base de cálculo: Supondremos una alimentación "F" de 1000 Kg/H

Balance general de masa:

$$F + A = C$$

Balance específico de KOH:

$$F(xA_F) + A(xA_A) = C(xA_C)$$

$$1000\frac{Kg}{H}(0.3) + A(0) = C(0.05)$$

Despejando, la corriente C es:

$$C = \frac{300\frac{Kg}{H}}{0.05}$$

$$\mathbf{C = 6000\frac{Kg}{H}}$$

La corriente A:

$$A = C - F$$

$$A = 6000\frac{Kg}{H} - 1000\frac{Kg}{H}$$

$$\mathbf{A = 5000\,\frac{Kg}{H}}$$

Comprobación:

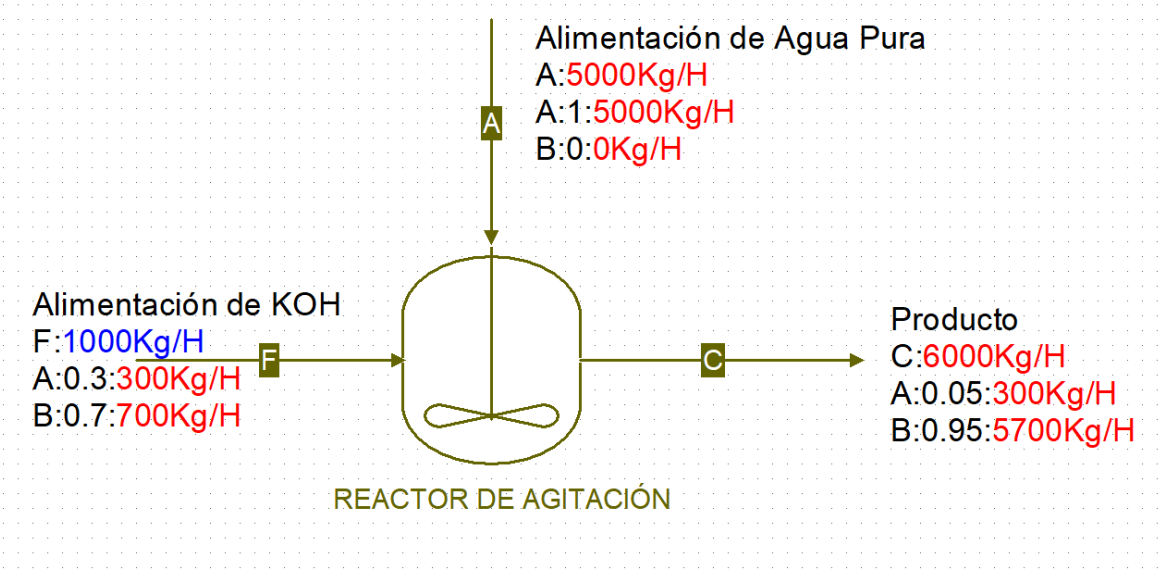
$$C(xB_C) = F(xB_F) + A(xB_A)$$

$$6000\,\frac{Kg}{H}(0.95) = 1000\,\frac{Kg}{H}(0.7) + 5000\,\frac{Kg}{H}(1)$$

$$5700\,\frac{Kg}{H} = 5700\,\frac{Kg}{H}$$

En la figura 13, se presenta un diagrama de los resultados que se obtuvieron del ejercicio 2.

Figura 13. *Representación esquemática del ejercicio con los resultados obtenidos*



Nota. Elaboración propia, 2025,

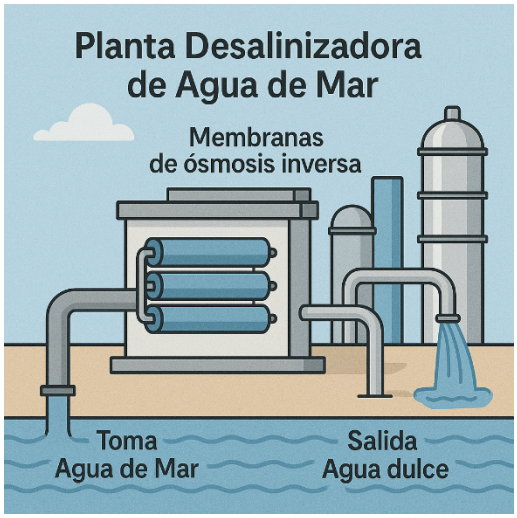
Un ejemplo contemporáneo de balance de materia sin reacción química se observa en las plantas desalinizadoras de agua de mar. En estos sistemas, los balances permiten calcular la proporción de agua dulce obtenida y la concentración de sales en la corriente de rechazo. Esta aplicación resulta clave en

regiones con estrés hídrico, donde la eficiencia del proceso impacta directamente en la disponibilidad de agua potable.

Ejercicio 3: Planta desalinizadora de agua de mar

Dato curioso: La planta desalinizadora de agua de mar (figura 14) representa una alternativa innovadora frente a la escasez de agua dulce, ya que utiliza procesos avanzados para separar las sales y obtener agua apta para consumo humano e industrial. Su carácter innovador radica en el uso de tecnologías de membranas de ósmosis inversa, que permiten operar con mayor eficiencia energética y menor impacto ambiental en comparación con métodos térmicos tradicionales. Además, estas plantas integran sistemas de recuperación de energía y optimización de flujos, lo que incrementa el rendimiento global del proceso y reduce costos operativos.

Figura 14. *Representación esquemática de una planta desalinizadora de agua de mar.*



Nota. Elaboración propia, 2025

En la actualidad, las plantas desalinizadoras se consideran parte esencial de la gestión sostenible de recursos hídricos, especialmente en regiones áridas y

zonas costeras con alta demanda poblacional e industrial. Las tendencias contemporáneas incluyen la incorporación de energías renovables (solar, eólica) para alimentar el proceso, el desarrollo de nuevas membranas de nanomateriales con mayor selectividad y resistencia, y la aplicación de herramientas de simulación y control avanzado de procesos. De este modo, la desalación se posiciona como una solución tecnológica de vanguardia, alineada con los desafíos de sostenibilidad y seguridad hídrica a nivel global.

Planteamiento del ejercicio: Una planta desalinizadora (figura 15) trata 10 000 kg/h de agua de mar cuya salinidad es 35 g de sal por kg de agua. El sistema produce una corriente de agua dulce (permeado) de 7 000 kg/h cuya salinidad es 0,5 g de sal por kg de agua. El resto sale como corriente de rechazo (concentrado).

1. Plantee los balances de materia relevantes (agua y sal).
2. Calcule la **s**alinidad (kg de sal por kg de agua) en la corriente de rechazo y exprésela también en g/kg y en porcentaje en masa.
3. Calcule la recuperación de agua (porcentaje de alimentación convertido a permeado).

Figura 15. *Representación esquemática del problema con sus datos iniciales.*

Resolución:

- Flujo de alimentación: F = 10 000 kg/h
- Salinidad de la alimentación: S_F = 35 g/kg = 0,035 kg/kg
- Flujo de permeado: P = 7 000 kg/h
- Salinidad del permeado: S_P = 0,5 g/kg = 0,0005 kg/kg
- Flujo de rechazo (concentrado): R = ?

Balances de materia (sin reacción)

- Balance total (masa):

$$F = P + R$$

Se despeja R:

$$R = F - P$$

$$R = 10000 \text{ kg/h} - 7000 \text{ kg/h}$$

$$R = 3000 \text{ kg/h}$$

- **Balance de sal (componente, estado estacionario):**

La masa de sal que entra con la alimentación debe salir en permeado y rechazo:

$$F.S_F = P.S_P + R.S_R$$

Despejamos S_R:

$$\boldsymbol{S_R = \frac{F.S_F - P.S_P}{R}}$$

$$\boldsymbol{S_R = \frac{\left(10000\frac{kg}{h}\right).(0.035) - \left(7000\frac{kg}{h}\right).(0.0005)}{3000\ kg/h}}$$

$$\boldsymbol{S_R = 0.1155 \frac{kg}{kg}}$$

S = 0,1155 kg de sal por kg de rechazo = 11.55% en masa

- Recuperación de agua (ratio de recuperación)

$$R = \frac{P}{F}$$

$$R = \frac{7000 \frac{kg}{h}}{10000 \frac{kg}{h}}$$

$$\boldsymbol{R = 0.70 = 70\%}$$

Con un 70 % de recuperación, se obtiene una fracción grande de agua dulce pero el rechazo queda bastante concentrado (≈ 11,55% de sales), lo cual demanda gestión: tratamiento del concentrado, manejo ambiental o procesos de evaporación/evaporadores para reducir volumen.

Actividad de Aprendizaje

Objetivo: Aplicar los principios de balance de materia en sistemas sin reacción química, identificando el tipo de sistema, realizando diagramas de flujo, y planteando balances globales y por componentes en situaciones reales o simuladas.

Instrucciones:

Responde las siguientes preguntas de forma clara y argumentada. Utiliza un ejemplo práctico (real o hipotético) de un proceso sin reacción química, como

una operación de mezcla, separación, dilución o concentración, que hayas observado o estudiado.

Parte A. Comprensión de conceptos

1. ¿Qué caracteriza a un balance de materia sin reacción química? ¿En qué se diferencia del balance con reacción?
2. ¿Qué tipos de procesos industriales requieren este tipo de balances? Menciona al menos dos y explica brevemente.
3. ¿Qué es un balance global y qué es un balance por componentes? ¿Cuándo es necesario aplicar uno u otro?
4. ¿Cuál es la importancia de asumir estado estacionario o transitorio al realizar un balance de materia?

Parte B. Aplicación a un caso práctico

Selecciona o diseña un proceso sencillo sin reacción química, como la concentración de una solución por evaporación, la mezcla de líquidos en un tanque o la filtración de un sólido en suspensión.

5. Describe el proceso elegido, identificando todas las corrientes de entrada, salida y acumulación (si aplica).
6. Clasifica el sistema como abierto, cerrado o aislado, y el proceso como continuo o por lotes. Justifica tu elección.
7. Elabora un diagrama de flujo del proceso, señalando todos los datos conocidos (flujo másico o volumétrico, composición, densidad, etc.).
8. Plantea el balance de materia global del proceso en estado estacionario.
9. Si existen al menos dos componentes en el sistema, plantea también un balance por componentes para uno de ellos.

10. Calcula alguna variable faltante en el sistema (flujo de salida, concentración, etc.) a partir de los datos conocidos. Muestra tu procedimiento.

Parte C. Reflexión

11. ¿Qué aprendiste sobre la utilidad del balance de materia sin reacción química en el análisis y control de procesos?
12. ¿Qué retos encontraste al aplicar el balance a un caso práctico? ¿Cómo los superaste o cómo lo harías en un entorno profesional?

Sugerencia docente: Puedes evaluar esta actividad con una rúbrica sencilla basada en: comprensión conceptual, aplicación correcta, claridad del diagrama y profundidad en la reflexión.

Cierre y Conexión:

Aquí aplicaste el balance de materia sin reacción comprobando que en estado estacionario la suma de entradas por componente es igual a la suma de salidas integraste recirculaciones y cortes y resolviste especificaciones de composición logrando trazabilidad de cada supuesto y de cada ecuación empleada.

En el capítulo III se introduce la reacción química y con ella los términos de generación y consumo que enlazaremos mediante estequiometría conversión rendimiento y selectividad usando la extensión de reacción para cerrar el sistema con transparencia algebraica. Como ejemplos de campo este marco te permite dimensionar una planta desalinizadora por balance de sal sintonizar una torre de absorción por componente ácido y calcular factores de dilución en formulación

de mezclas alimentarias o farmacéuticas con control estricto de fracciones másicas o molares.

Antes de avanzar te invito a convertir uno de tus ejercicios de mezcla o separación en una pequeña plantilla con celdas editables para caudales y composiciones porque esa plantilla servirá como base al incorporar reacciones en el capítulo siguiente.

Referencias bibliográficas

Boyacá Mendivelso, L. A. (2019). *Balance de materia orientado a procesos* ((ed.). Ed). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/189655

Chen, C.-T. (2022). *MATLAB Applications in Chemical Engineering*. Chyi-Tsong Chen. https://books.google.com/books?id=kpxwEAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=MATLAB+Applications+in+Chemical+Engineering&hl=es&newbks=1&newbks_redir=1&sa=X&ved=2ahUKEwiMxrn5v8mPAxWMRzABHWMNJxkQ6AF6BAgNEAM

Clough, D. E. (2016). Use Spreadsheets for excel para ingenieria quimica. *Chemical Engineering Progress*, *August*, 25–34. https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20160825_0.pdf

Dhagat, S., Jujjavarapu, S. E., Kumar, N. S. S., & Mahapatra, C. (2024). *Recent Advances in Bioprocess Engineering and Bioreactor Design*. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-97-1451-3

Felder, Richard; Rousseau, R. (2003). *Principios elementales de los procesos químicos* (Limusa Wil). https://hdquimicaeiqtotalh.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/10/libro-de-balance-felder.pdf

Fito Suñer, P. J. Castelló Gómez, M. L. & Tarrazó Morell, J. (2023). *Balances de*

materia y energía en ingeniería de bioprocesos: (2 ed.) (Editorial). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/238439

Galagovsky, L., & Giudice, J. (2015). Estequiometría y ley de conservación de la masa: una relación a analizar desde la perspectiva de los lenguajes químicos. *Ciência & Educação (Bauru)*, *21*(1), 85–99. https://doi.org/10.1590/1516-731320150010006

Gallego, M. (2019). *Excel 2019: avanzado: (1 ed.)*. (RA-MA Edit). https://books.google.com.ec/books?id=78y4EAAAQBAJ&pg=PT4&dq=Excel+2019:+avanzado:+(1+ed.).&hl=es&newbks=1&newbks_redir=1&sa=X&ved=2ahUKEwi_7tfBwMmPAxW1RjABHWi2GF0Q6AF6BAgNEAM

Garavito, N. G. (2007). *Balance De Materia Libro Guía De Clase*. 1–3. https://www.academia.edu/36750523/BALANCE_DE_MATERIA_LIBRO_GUÍA_DE_CLASE_NÉSTOR_GOODING_GARAVITO

Himmelblau, D. M. (1997). *Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química* (PRENTICE-H). https://celqusb.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/01/principios-bc3a1sicos-y-cc3a1lculos-e-ingenieria-quc3admica-himmelblau-6ed.pdf

Maroto Valiente, Á. & Muñoz Andrés, V. (2013). *Operaciones unitarias y reactores químicos* (UNED-Uni). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/48624

Martín, M. M. (2025). *Introduction to software for chemical engineers*. CRC Press. https://books.google.com.ec/books?id=MlpEEQAAQBAJ&pg=PT607&dq=Introduction+to+software+for+chemical+engineers&hl=es&newbks=1&newbks_redir=1&sa=X&ved=2ahUKEwjAw8yKwMmPAxWWRjABHQ0WNnkQ6AF6BAgNEAM

Matlab, L. (2021). MATLAB & Simulink. *Retrieved September*. https://www.mathworks.com/products/matlab.html

Monsalvo Vázquez, R. & M. del R. R. S. (2015). *Balance de materia y energía: procesos industriales* (Editorial).

https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/39426

Nandagopal, N. S. (2023). *Chemical engineering principles and applications*. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-27879-2

Rojas González, A. F. (2012). *Fundamentos de procesos químicos* (Universida). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/127951

Rosas-Martínez, J. M., Valero-Romero, M. J., García-Mateos, F. J., Ruiz-Rosas, R. R., Rodríguez-Mirasol, J., & Cordero-Alcántara, T. (2022). Resolución de problemas modelo de Ingeniería Química usando MATLAB. *VI Congreso de Innovación Docente En Ingeniería Química*. https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/24752/T3_Poster_Flash_Rosas.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Zapata, A., & Artbox, E. (2012). BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA. Formulación, solución y usos en Procesos Industriales. In *BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA. Formulación, solución y usos en Procesos Industriales. Corregida y aumentada*. https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/46c24dcb-d457-41eb-83eb-01da1ff62489/content

CAPÍTULO III. Balances de Materia con Reacción Química

Resumen

Este capítulo introduce el estudio de balances de materia en sistemas donde ocurren reacciones químicas, incorporando una nueva dimensión al análisis de procesos. A diferencia de los balances sin reacción, aquí la masa de los componentes individuales puede cambiar debido a la conversión química. Por ello, es fundamental considerar las relaciones estequiométricas, el rendimiento de la reacción, la conversión de los reactivos y la selectividad de los productos, como parámetros clave para establecer balances precisos.

Se presentan estrategias para plantear balances globales y por componentes en reactores y otros equipos de proceso, tanto en estado estacionario como transitorio. Se destaca la importancia de identificar el componente limitante, calcular el exceso de reactivo y comprender cómo la reacción impacta las corrientes de entrada y salida. Además, se hace énfasis en el uso de diagramas de flujo y en el planteamiento ordenado de datos conocidos y desconocidos, facilitando así la resolución estructurada de problemas reales.

El enfoque técnico y humanizado de este capítulo busca que el estudiante no solo desarrolle destrezas analíticas, sino también una visión crítica sobre el comportamiento de los procesos químicos. Se promueve una comprensión profunda del papel de las reacciones en la transformación de materia y energía, subrayando su relevancia para el diseño de procesos eficientes, sostenibles y alineados con las necesidades sociales e industriales.

Objetivos de aprendizaje

- Comprender los principios fundamentales de la conservación de la masa en procesos con reacción química.

- Definir y aplicar conceptos clave como conversión, rendimiento y selectividad en procesos con reacción química.
- Aplicar balances de materia con reacción química a procesos industriales reales, considerando componentes limitantes y en exceso.

Resultados de aprendizaje

- El estudiante explica cómo la conservación de la masa se aplica en procesos donde intervienen reacciones químicas, diferenciando entre componentes reaccionantes, productos e inertes.
- El estudiante calcula la conversión de reactivos, el rendimiento de un producto deseado y la selectividad frente a productos secundarios, aplicando estos conceptos en ejercicios prácticos.
- El estudiante identifica el reactivo limitante y en exceso en un proceso industrial, y aplica el balance de materia para determinar flujos másicos o molares de entrada y salida en condiciones operativas reales.

Para los balances de materia con reacción química es importante considerar los términos de "Generación" y "Consumo", los cuales se calculan en base al comportamiento de las reacciones químicas que ocurren durante el proceso. Matemáticamente, para analizar un balance de materia en estado estacionario con reacción química, se expresa (Felder y Rousseau, 2003):

$$Entrada - Salida + Generación - Consumo = Acumulación$$
$$Entrada - Salida + Generación - Consumo = 0$$
$$Entrada + Generación - Consumo = Salida$$

3.1. *Principios fundamentales: estequiometría y extensión de reacción.* La estequiometría se refiere al estudio teórico del comportamiento en como reactivos reaccionan para generar productos en una determinada proporción, siendo esta proporción representada por coeficientes v_i, que indica el número de moles o moléculas que participa en la reacción individual, esto debido a que una

misma reacción química puede tener diferentes coeficientes (Himmelblau, 1997). Sin embargo, siempre se cumplirá el balance estequiométrico de los elementos (átomos) participantes.

$$v_a A + v_b B \leftrightarrow v_c C + v_d D$$

Es importante determinar el equilibrio estequiométrico de las reacciones químicas participantes de un proceso, dado a que estos proporcionarán los coeficientes estequiométricos individuales para el estudio de cada reacción química participante de manera individual. Es decir que nos permitirá analizar la relación estequiométrica que se cumple entre cada par de especies participantes en la reacción química individual, sirviendo como cálculo para la cantidad de reactivo consumido o producto generado, a partir de otra especie química diferente que participe en la misma reacción a través de la relación de sus coeficientes (Dhagat *et al.*, 2024).

Obsérvese el siguiente ejemplo en donde se realiza la producción de ácido sulfúrico a partir de dióxido de azufre(SO_2) y oxígeno molecular (O_2) dado por las reacciones (1, 2, 3) y un proceso de producción unitaria de trióxido de azufre (4):

Proceso 1:

$$2SO_{2(g)} + 1O_{2(g)} \rightarrow 2SO_{3(g)} \qquad (1)$$

$$1SO_{3(g)} + 1H_2SO_{4(l)} \rightarrow 1H_2S_2O_{7(l)} \quad (2)$$

$$1H_2S_2O_{7(l)} + 1H_2O_{(l)} \rightarrow 2H_2SO_{4(l)} \qquad (3)$$

Proceso 2:

$$1SO_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow 1SO_{3(g)} \qquad (4)$$

Se puede observar que todas las ecuaciones están balanceadas para cumplir la producción del proceso total, por lo que los coeficientes

estequiométricos son correctos en cada una de las reacciones individuales para los procesos estudiados. La relación estequiométrica para la reacción (1) en función al dióxido de azufre, indica que se deben consumir 2 moles de dióxido de azufre para generar 2 moles de trióxido de azufre, lo cual sería recíproco a decir que por cada 2 moles de trióxido de azufre generadas se consume 2 moles de dióxido de azufre:

$$\frac{2SO_{3(g)}}{2SO_{2(g)}} \quad o \quad \frac{2SO_{2(g)}}{2SO_{3(g)}}$$

Por otro lado, la relación estequiométrica para la reacción (4) del segundo proceso en función al mismo componente, indica que se consume 1 mol de Dióxido de azufre para producir una mol de trióxido de azufre, así mismo se puede establecer un recíproco:

$$\frac{1\,SO_{3(g)}}{1\,SO_{2(g)}} \quad o \quad \frac{1\,SO_{2(g)}}{1\,SO_{3(g)}}$$

Es importante señalar que para establecer una relación estequiométrica hay que considerar la terminología de generación y consumo, es decir (Garavito, 2007):

- Comparación entre dos reactivos: Si el reactivo A se compara con un reactivo B, su relación estequiométrica sería se expresaría:

$$\frac{v_b B_{consume}}{v_a A_{consume}}$$

- Comparación entre un reactivo y un producto: Si el reactivo A se compara con un producto C, su relación estequiométrica se expresaría:

$$\frac{v_c C_{genera}}{v_a A_{consume}}$$

- Comparación entre productos: Si el producto C se compara con un producto D, su relación estequiométrica se expresaría:

$$\frac{v_c C_{genera}}{v_d D_{genera}}$$

Inversamente para todos los casos, también se mantiene la misma idea del uso expresivo en una relación estequiométrica, dado a que un reactivo no genera otro reactivo, un producto no genera un reactivo y un producto no consume a otro producto en una reacción química dada.

Así mismo, la estequiometría permite establecer a partir de una reacción química individual en equilibrio el reactivo limitante y reactivo en exceso, grado de avance de la reacción y fracción de conversión.

Dado un proceso donde ocurre una reacción química, en donde se ingresa una determinada cantidad de materia de un componente reactivo (A), y se proporciona una reacción estequiométrica balanceada, se puede definir a este componente como un reactivo límite o en exceso si al compararse con la cantidad de materia inicial de otro reactivo (B) que participa para esa misma reacción química, se cumple que:

$$v_a A + v_b B \leftrightarrow v_c C + v_d D$$

$$n_{A0} * \frac{v_b B_{consume}}{v_a A_{consume}} < n_{B0}$$

El reactivo (A) es el limitante.

$$n_{A0} * \frac{v_b B_{consume}}{v_a A_{consume}} > n_{B0}$$

El reactivo (A) está en exceso y el reactivo (B) es el limitante.

La misma analogía puede realizarse en función a los productos, a partir de las cantidades iniciales de materia que ingresa de reactivos al proceso, y su relación estequiométrica de cada uno de los reactivos para un mismo producto. El reactivo que genere mayor cantidad de producto según su relación estequiométrica estará en exceso y el que genere menor cantidad de producto es el limitante.

$$n_{A0} * \frac{v_c C_{genera}}{v_a A_{consume}} = C_A$$

$$n_{B0} * \frac{v_c C_{genera}}{v_b B_{consume}} = C_B$$

$$C_A > C_B : B\ es\ el\ reactivo\ limitante$$

$$C_A < C_B : A\ es\ el\ reactivo\ limitante$$

Además, si las comparaciones detalladas anteriormente son iguales, se puede indicar que todos los reactivos son limitantes o que ninguno lo es, depende como se muestre el caso para el proceso general.

$$n_{A0} * \frac{v_b B_{consume}}{v_a A_{consume}} = n_{B0}$$

$$C_A = C_B$$

A partir del concepto de reactivo en exceso, también se lo puede relacionar en función a la fracción en exceso, la cual indica la proporción en que excede cualquier reactivo (i) a partir de lo que se alimenta y se consume estequiométricamente en un reactor químico (Felder y Rousseau, 2003).

$$Fracción\ exceso\ i = \frac{n_{i\ alimentado} - n_{iconsume\ teóricamente}}{n_{iconsume\ teóricamente}}$$

Es importante aclarar que el reactivo en exceso es aquel que se encuentra en una cantidad superior a lo que se requiere estequiométricamente del reactivo

limitante y debe analizarse de acuerdo con el sistema del proceso, esto debido a que el reactivo en exceso se puede alimentar también desde otra línea o corriente. Las moles que se requieren consumir teóricamente están en función al reactivo limitante como si este reaccionara completamente con todo lo alimentado, es decir que para un análisis en el reactor no se considera la cantidad del reactivo limitante que realmente puede reaccionar (Felder y Rousseau, 2003).

$$Fracción\ exceso\ i = \frac{n_{\mathrm{i}\ alimentado} - n_{\mathrm{i}\ consume\ si\ el\ reactivo\ limitante\ se\ conusme\ completamente}}{n_{\mathrm{i}\ consume\ si\ el\ reactivo\ limitante\ se\ conusme\ completamente}}$$

$$Fracción\ exceso\ i = \frac{n_{\mathrm{i}\ alimentado} - n_{A0\ alimentado} * \frac{v_i i}{v_a A}}{n_{A0\ alimentado} * \frac{v_i i}{v_a A}}$$

Ahora, nótese la diferencia de coeficientes estequiométricos a pesar de tratarse de la misma reacción entre la reacción (1) del proceso 1 y (4) del proceso 2. Debido a que una misma reacción química puede tener diferentes coeficientes estequiométricos es por lo que nace el concepto de "extensión de reacción" o "grado de avance de reacción". La extensión de reacción permite definir para los reactivos y productos participantes dentro de una reacción química establecida cuanto se consume o se genera, es decir su variación dentro del proceso de reacción.

Este concepto es clave dado a que su valor **ξ** será el mismo para todas las especies químicas participantes en una determinada reacción estequiométrica, pero diferente para una reacción química similar, pero con coeficientes diferentes.

Su expresión, está definida por las moles finales de una especie química (i) participante del proceso menos sus moles finales obtenidas, dividido para su coeficiente correspondiente para la determinada reacción química

estequiométrica v_i, el cual se le asigna como (0) si se trata de una especie inerte en la reacción, (+) si se trata de un producto, y (-) si se trata de un reactivo, expresándose de la siguiente manera (Felder y Rousseau, 2003):

$$\xi_i = \frac{n_{i\ salida} - n_{i\ entrada}}{\pm v_i}$$

3.2. *Rendimiento, conversión y selectividad.* Como se planteó anteriormente en el Proceso 1, en toda operación donde ocurre reacciones químicas, por lo general no todo el reactivo obedece al comportamiento estequiométrico de una sola reacción, por lo que puede generar otros productos siendo estas reacciones parciales o secundarias que probablemente no sean deseables puesto a que pueden provocar reacción con los productos de interés poco obtenidos. También, dicho reactivo puede no reaccionar, por lo que se necesita reutilizarlo para lograr un mayor aprovechamiento de materia prima.

Por ello, en el diseño de un proceso químico es importante considerar la conversión de un reactivo, el rendimiento que se obtiene de un producto de interés y su selectividad, puesto a que son parámetros que permiten tener un control sobre el comportamiento de una especie interesada y de las inaceptables (Himmelblau, 1997).

3.2.1. *Rendimiento.* Definimos al rendimiento como la cantidad de materia obtenida de una especie de interés (C), dividido para su materia obtenida teorizada de una reacción completa por parte del reactivo limitante (i), en función a la estequiometría de la reacción de interés.

$$Rendimiento\ de\ C = \frac{n_{C\ generados}}{n_{i0} * \frac{v_c}{v_i}} * 100$$

Por lo general, se utiliza para saber el rendimiento de un producto generado de interés (C) en un proceso químico.

3.2.2. *Conversión.* Anteriormente se mencionó que no todo el reactivo reacciona para la formación de productos deseables por diferentes casos, por lo que se obtienen trazas de reactivo sin consumir. Por ello, la conversión está dada como la cantidad de reactivo de interés o limitante que reacciona sobre la cantidad alimentada de este reactivo inicialmente. Considerando en que nos encontramos en sistemas de estado estacionario una forma de expresar el grado de conversión (X_i) en función a un reactivo limitante (i) sería:

$$Salida = Entrada + Generación - Consumo$$

$$n_i = n_{i0} + 0 - \mathrm{n_{i0}}\left(X_i \frac{moles\ consumidos}{moles\ alimentados}\right)$$

$$\mathrm{n_{i0}}(X_i) = n_{i0} - n_i$$

$$\left(X_i \frac{moles\ consumidos}{moles\ alimentados}\right) = \frac{n_{i0\ \mathrm{moles\ alimentados}} - n_{i\ moles\ salida}}{\mathrm{n_{i0\ moles\ alimentados}}}$$

El resultado de esta expresión nos permite en función del reactivo limitante (i) conocer cuanta es la cantidad que realmente es utilizada para ser consumida y formar productos. Por lo que, la fracción complementaria, nos permite conocer el grado en que el reactivo limitante alimentado no reacciona.

$$1 - X_i = grado\ de\ reactivo\ i\ que\ no\ se\ consume$$

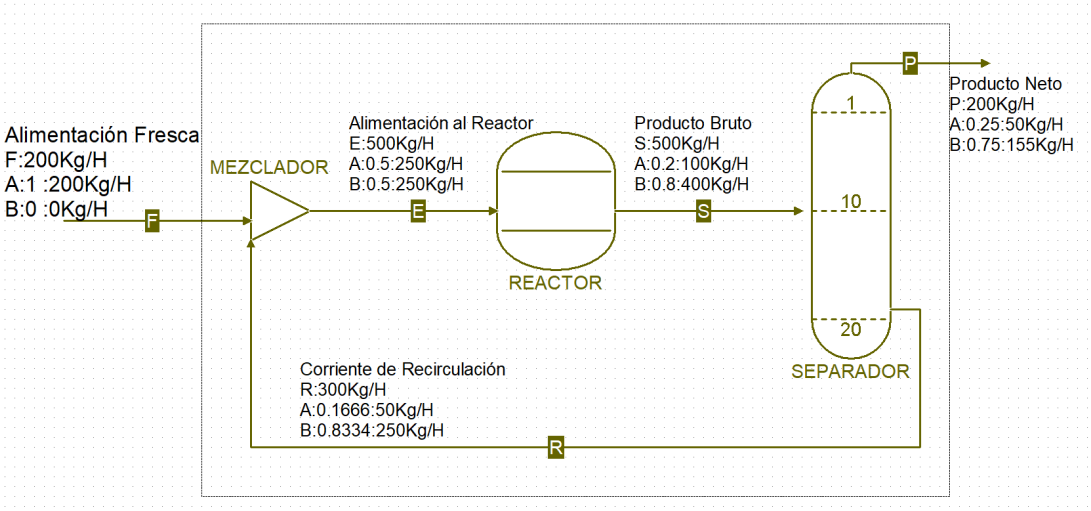
De manera más amplia, para cualquier especie química (A) participante en una reacción química estequiométricamente balanceada en el reactor, se puede establecer la cantidad final de moles a partir del grado de avance de reacción del reactivo limitante (i) y el grado de conversión de la siguiente manera:

$$n_A = n_{i0} \pm \left(\frac{v_{A\ (X_i)}}{v_i}\right)$$

- Se asignará (+) si el reactivo (A) es un producto para referencia.
- Se asignará (-) si el reactivo (A) es un reactivo para referencia.

Dado a que el concepto de conversión resulta ambiguo de abarcar, es importante definirlo para su estudio sobre un proceso global o únicamente por lugar que ocurre la reacción (reactor), como se refleja en la figura 16.

Figura 16. Esquema de un reactor con la conceptualización de conversión



Fuente: Autoría propia, 2025.

3.2.2.1. *Conversión fraccional global.* Se define como la diferencia de las moles de reactivo limitante (i) que ingresa en una alimentación nueva o fresca con las moles de este reactivo que salen del proceso global como producto neto, dividido para las mismas moles de reactivo limitante (i) ingresados en la alimentación nueva.

$$X_i = \frac{n_{i0\ alimentación\ fresca} - n_{i\ salida\ producto\ neto}}{n_{i0\ alimentación\ fresca}}$$

3.2.2.2. *Conversión fraccional en una sola pasada por el reactor.* Se define como la diferencia de las moles de reactivo limitante (i) que ingresan como alimento al reactor con las moles de este reactivo que salen del proceso global como producto bruto, dividido para las mismas moles de reactivo limitante (i) alimentados al reactor.

$$X_i = \frac{n_{i0\ alimentación\ al\ reactor} - n_{i\ salida\ \text{del reactor}\ producto\ bruto}}{n_{i0\ alimentación\ al\ reactor}}$$

3.2.3. *Selectividad*. La selectividad de un compuesto deseado (C) se determina por los moles de uno de los productos no deseados (D) que se obtienen entre las reacciones secundarias que conforman a un proceso o de una única reacción química. Es decir:

$$Selectividad\ (C) = \frac{n_{C\ deseado\ generado}}{n_{D\ indeseado\ generado}}$$

Una selectividad alta indica que se ha disminuido considerablemente la producción de especies no deseadas en un reactor o proceso, lo cual es beneficioso y rentable, así mismo debe analizarse en contraste al rendimiento del reactivo limitante en el reactor o proceso para saber que se ha optimizado de mejor manera un proceso químico de una o varias unidades.

3.3. *Sistemas con múltiples reacciones químicas*. Para sistemas en los que intervienen múltiples reacciones químicas (j), es importante considerar que las moles finales de una especie (i), en función al grado de avance de reacción de cada una de las reacciones participantes, y del reactivo limitante (i), se obtienen con la siguiente expresión (Monsalvo Vázquez, 2015):

$$n_A = n_{i0} + \sum_j \left(\frac{v_{A\ (X_i)}}{\pm v_i}\right)$$

Así mismo, se puede verificar que las moles totales de un proceso global:

$$n_t = \sum n_{i0}\ (productos + reactivos\ alimentados) + \sum_j \left(v_{ij*\xi j}\right)$$

En donde se rescata que se ubicará para v_{ij} signo (+) para productos, (-) para reactivos y (0) para especies inertes en la reacción química.

El reactivo limitante alimentado (i), se sabe que puede tener un grado de conversión para la formación de productos en una reacción química (X_i). Sin embargo, para múltiples reacciones químicas se debe considerar que probablemente parte del reactivo disponible para reaccionar se vea influenciado en reaccionar en mayor o menor cantidad para cualquiera de las múltiples reacciones químicas que ocurren en un reactor.

Este grado de afinidad (f_j) que se puede presenciar debe ser considerado dentro del estudio del balance de materia para las especies químicas (A), el cual represente la fracción en la que el reactivo limitante que reacciona sirve para cada una de las reacciones químicas (j) participantes, por lo que en función del grado de avance de reacción resultaría:

$$n_A = n_{i0} * \left[\frac{n_{A0}}{n_{i0}} + \sum_j \left(\frac{v_{aj} * (X_i)(f_j)}{\pm v_{ij}} \right) \right]$$

Don de se asignará (+) si la especie (A) es un producto en la reacción (j), (-) si la especie (A) es un reactivo en la reacción (j) y (0) si la especie (A) es un inerte en la reacción (j).

Para resolución de problemas con sistemas con múltiples reacciones químicas es importante comprender cada uno de los conceptos detallados anteriormente, así mismo tener una metodología de resolución adecuada para analizar el balancee de las especies que entran y salen del proceso por lo que un balance por especie atómica o un balance por especies moleculares, resultarán útiles para la resolución de problemas en los que intervienen reacciones químicas, dadas las relaciones estequiométricas para el consumo de los reactivos y generación de los productos (Fito *et.*, 2023).

3.4. Ejercicios de aplicación de balance de materia con reacción química

Ejercicio 4: Combustión del etano

Dato curioso: La combustión del etano (C_2H_6) es un proceso clásico en la ingeniería química que consiste en la oxidación completa del hidrocarburo en presencia de oxígeno para producir dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O), liberando una cantidad significativa de energía. Este proceso ha sido históricamente utilizado como fuente de calor y energía en industrias y sistemas de generación, representando un ejemplo fundamental en la aplicación de balances de materia y energía.

Lo innovador y contemporáneo en el estudio de la combustión del etano se relaciona con el desarrollo de tecnologías de combustión limpia y controlada, que buscan optimizar la eficiencia del proceso reduciendo emisiones contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO_x) o monóxido de carbono (CO). Actualmente, el análisis de este tipo de combustión se apoya en modelos computacionales avanzados y en el diseño de reactores con sistemas de captura de CO_2, lo que permite vincular el uso de combustibles fósiles con estrategias de sostenibilidad y transición energética. Así, la combustión del etano se mantiene como un tema de relevancia contemporánea tanto en la formación de ingenieros químicos como en la investigación de energías más limpias.

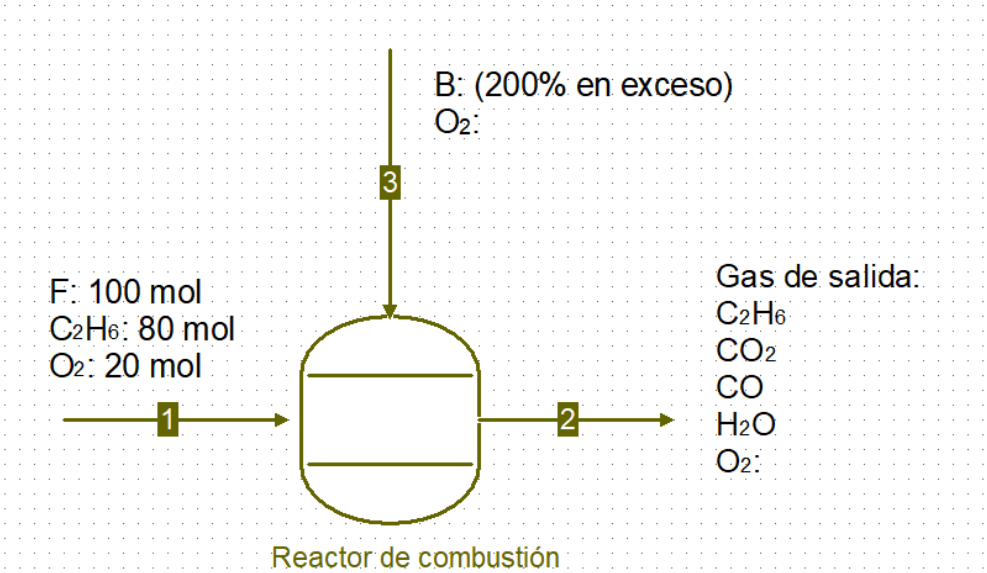
Planteamiento del problema: Se realiza en un reactor en estado estacionario la combustión completa de etano (figura 17) a partir de las siguientes reacciones químicas:

$$C_2H_6 + \frac{7}{2}O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O \quad (1)$$

$$C_2H_6 + \frac{5}{2}O_2 \rightarrow 2CO + 3H_2O \quad (2)$$

Si se alimentan 80 moles de etano con 20 moles de oxígeno molecular en la corriente 1 y en la corriente 2 se inyecta oxígeno con un 200% en exceso, en las cuales ocurre un 80% de conversión del etano que se alimenta al reactor, y del etano que reacciona, el 25% forma monóxido de carbono, con el objetivo de formar principalmente dióxido de carbono, ¿Cuáles serían los flujos molares a la salida del sistema, su composición molar, el rendimiento y la selectividad del dióxido de carbono para la producción de monóxido de carbono?

Figura 17. *Representación esquemática del problema con sus datos iniciales.*



Fuente: Autoría propia, 2025.

Resolución:

Resolveremos el presente problema identificando los datos que se nos presentan, el reactivo limitante y en exceso, conversión, grado de afinidad en las especies químicas, y producto de interés para la reacción prioritaria.

Reactivo limitante (i): Etano

$$\left(X_i \frac{moles\ consumidos}{moles\ alimentados}\right) = 0.8$$

Nótese que al tratarse de un proceso en donde las reacciones ocurren en un solo reactor de una única unidad de proceso, la fracción de conversión se presenta como un concepto ambiguo dado a que puede ser válida si se analiza para una pasada en el reactor como al proceso. Por lo que, para diferentes sistemas es importante tener clara la distinción de la conversión para el reactivo limitante que se presente.

$f_1 = 0.75$
$f_2 = 0.25$
Producto de interés: CO_2
Reacción prioritaria: (1)
Reacciones participantes (j): (1) y (2)
Reactivo en exceso: Aire
$Fracción\ exceso\ O_2 = 2$

Estableceremos el balance general de masa para procesos en estado estacionario en donde ocurren reacciones químicas para el estudio de cada una de las especies químicas participantes:

Balance general de masa con reacción química en sistema estacionario:

$$Salida = Entrada + Generación - Consumo$$

Para el presente reactor se debe considerar como se comportan las especies en cada una de las corrientes de entrada y salida.

Balance de materia para las especies químicas en el reactor:

$$n_{Gas\ de\ salida} = n_{i0} * \left[\frac{n_{A0}}{n_{i0}} + \sum_j \left(\frac{v_{aj} * (X_i)(f_j)}{\pm v_{ij}}\right)\right]$$

$$n_{Gas\ de\ salida} = n_{i0} * \left[\frac{n_{A0F} + n_{A0B}}{n_{i0}} + \sum_j \left(\frac{v_{aj} * (X_i)(f_j)}{\pm v_{ij}}\right)\right]$$

Especie	Salida = Gas de salida
C_2H_6	$80\ mol\ C_2H_6 * \left[\frac{80\ mol\ C_2H_6}{80\ mol\ C_2H_6} + \frac{1 * (0.8)(0.75)}{-1} + \frac{1 * (0.8)(0.25)}{-1}\right]$
O_2	$80\ mol\ C_2H_6 * \left[\frac{20\ mol\ O_2 + n_{O_2B}}{80\ mol\ C_2H_6} + \frac{\frac{7}{2} * (0.8)(0.75)}{-1} + \frac{\frac{5}{2} * (0.8)(0.25)}{-1}\right]$
CO_2	$80\ mol\ C_2H_6 * \left[\frac{0\ CO_2}{80\ mol\ C_2H_6} + \frac{2 * (0.8)(0.75)}{+1}\right]$
H_2O	$80\ mol\ C_2H_6 * \left[\frac{0\ mol\ H_2O}{80\ mol\ C_2H_6} + \frac{3 * (0.8)(0.75)}{+1} + \frac{3 * (0.8)(0.25)}{+1}\right]$
CO	$80\ mol\ C_2H_6 * \left[\frac{0\ CO}{80\ mol\ C_2H_6} + \frac{2 * (0.8)(0.25)}{+1}\right]$

Obsérvese que, establecido los balances para las especies participantes en el reactor del sistema, se obtienen los siguientes resultados:

Especie	Salida = Gas de salida
C_2H_6	$16\ mol\ C_2H_6$
O_2	$80\ mol\ C_2H_6 * \left[\frac{20\ mol\ O_2 + n_{O_2B}}{80\ mol\ C_2H_6} + \frac{\frac{7}{2} * (0.8)(0.75)}{-1} + \frac{\frac{5}{2} * (0.8)(0.25)}{-1}\right]$
CO_2	$96\ mol\ CO_2$
H_2O	$192\ mol\ H_2O$

CO	$32\ mol\ CO$

Se han obtenido la mayoría de los flujos de salida de la corriente de Gas de salida, sin embargo, para encontrar las moles de salida para el reactivo en exceso "Oxígeno molecular" se necesita conocer las moles alimentadas por la corriente (B), las cuales están en función del concepto de "fracción en exceso", por lo que:

$$Fracción\ exceso\ O_2 = \frac{n_{O_2\ alimentado} - n_{O_2\ consume\ si\ el\ reactivo\ limitante\ se\ conusme\ completamente}}{n_{O_2\ consume\ si\ el\ reactivo\ limitante\ se\ conusme\ completamente}}$$

La cantidad de oxígeno consumido se determina en función a la reacción que contiene al producto de interés (CO_2), por lo que los coeficientes estequiométricos se toman de la reacción (1) planteada como si el reactivo limitante alimentado se consumiera por completo.

$$Fracción\ exceso\ O_2 = \frac{n_{O_2\ alimentado\ F} + n_{O_2\ alimentado\ B} - n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}{n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}$$

$$2 = \frac{20\ mol\ O_{2\ F} + n_{O_2\ alimentado\ B} - 80\ mol\ C_2H_6 * \frac{\frac{7}{2}O_2}{1C_2H_6}}{80\ mol\ C_2H_6 * \frac{\frac{7}{2}O_2}{1C_2H_6}}$$

$$n_{O_2\ alimentado\ B} = \left(2 * 80\ mol\ C_2H_6 * \frac{\frac{7}{2}O_2}{1C_2H_6}\right) + 80\ mol\ C_2H_6 * \frac{\frac{7}{2}O_2}{1C_2H_6}$$

$$n_{O_2\ alimentado\ B} = 820 mol\ O_2\ alimentación\ en\ B$$

Por lo tanto:

$$n_{O_2\,Salida} = 80\,mol\,C_2H_6$$

$$* \left[\frac{20\,mol\,O_{2\,F} + 840\,mol\,O_{2\,B}}{80\,mol\,C_2H_6} + \frac{\frac{7}{2} * (0.8)(0.75)}{-1} + \frac{\frac{5}{2} * (0.8)(0.25)}{-1} \right]$$

$$n_{O_2\,Salida} = 652\,mmol\,O_2$$

Resultados:

Especie	Salida = Gas de salida	Composición
C_2H_6	$16\,mol\,C_2H_6$	$x_{C_2H_6} = \frac{16}{988} = 0.0162$
O_2	$652\,mmol\,O_2$	$x_{02} = \frac{652}{988} = 0.6599$
CO_2	$96\,mol\,CO_2$	$x_{CO_2} = \frac{96}{988} = 0.0972$
H_2O	$192\,mol\,H_2O$	$x_{H_2O} = \frac{192}{988} = 0.1943$
CO	$32\,mol\,CO$	$x_{CO} = \frac{32}{988} = 0.0324$
Total	988 moles totales en Gas de Salida	1

Rendimiento del CO_2 de acuerdo con la reacción (1) de interés:

$$Rendimiento\ de\ CO_2 = \frac{n_{CO_2\,generados}}{n_{C_2H_6\,alimentado} * \frac{v_{CO_2}}{v_{C_2H_6}}} * 100$$

$$Rendimiento\ de\ CO_2 = \frac{96\,mol\,CO_2}{80\,mol\,C_2H_6 * \frac{2CO_2}{1C_2H_6}} * 100$$

$$Rendimiento\ de\ CO_2 = 60\%$$

Selectividad del Dióxido de carbono para la producción de Monóxido de carbono:

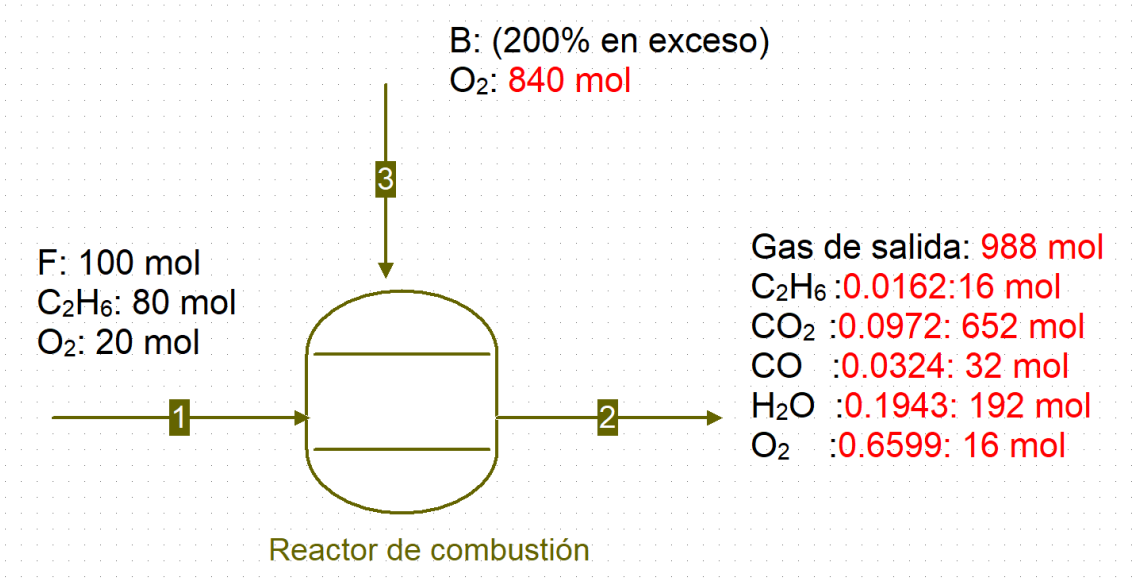
$$Selectividad\ (CO_2) = \frac{n_{CO_2\ deseado\ generado}}{n_{CO\ indeseado\ generado}}$$

$$Selectividad\ (CO_2) = \frac{96\ mol\ CO_2}{32\ mol\ CO}$$

$$Selectividad\ (CO_2) = 3$$

Análisis: Se puede observar los resultados en la figura 18, las reacciones que ocurren en el reactor son adecuadas para la producción Dióxido de carbono, dado a que se cuenta con una selectividad alta para su producción con las reacciones que ocurren dentro del sistema, además de tener un rendimiento por encima del 50% para la formación del producto de interés.

Figura 18. *Representación esquemática del ejercicio con los resultados obtenidos*



Fuente: Elaboración propia

En los últimos años, los balances de materia con reacción química se han convertido en herramientas estratégicas para el desarrollo de procesos sostenibles. Por ejemplo, en la síntesis de bioplásticos a partir de almidón o azúcares fermentables, los balances permiten controlar las conversiones y los

rendimientos, optimizando la sustitución de plásticos derivados del petróleo. De igual forma, en la conversión catalítica de dióxido de carbono en metanol, los balances son fundamentales para evaluar la eficiencia del proceso y su viabilidad como estrategia de reducción de emisiones.

Ejercicio 5: Síntesis de bioplástico PLA (ácido poliláctico) a partir de azúcares fermentables

Dato curioso: La síntesis de bioplástico PLA (ácido poliláctico) a partir de azúcares fermentables parte de la transformación de fuentes de carbono renovable (glucosa, sacarosa de maíz, caña o residuos agroindustriales) en ácido láctico mediante fermentación microbiana. A continuación, este ácido láctico se convierte en lactida y se polimeriza por apertura de anillo o policondensación para obtener PLA, un polímero biodegradable y compostable que evita la dependencia de recursos petroquímicos.

El PLA se emplea en envases y embalajes (botellas, films, bandejas y cubiertos), en fibras y no tejidos para textil y alfombras, en dispositivos médicos (suturas, matrices de liberación de fármacos) y, muy extendido, como filamento para impresión 3D. Además, sirve en agricultura como film mulch biodegradable, ofreciendo alternativas de menor huella de carbono frente a plásticos convencionales. En la figura 19, se observan algunas aplicaciones del PLA.

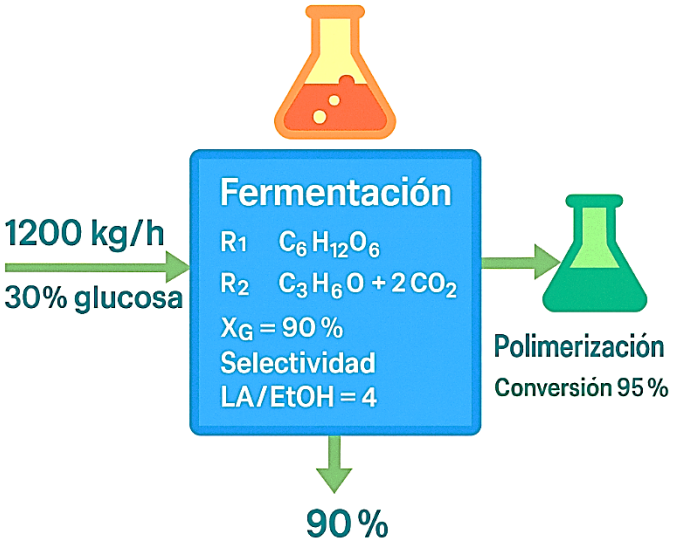
Figura 19. *Representación esquemática de las aplicaciones del PLA.*

Nota: Elaboración propia

La innovación en PLA avanza hacia el uso de azúcares de segunda generación (residuos lignocelulósicos), cepas microbianas metabolíticamente optimizadas y procesos integrados de biorrefinería que reducen pasos y consumo energético. Asimismo, se desarrollan copolímeros y mezclas con fibras naturales para mejorar propiedades mecánicas y térmicas, junto a esquemas de economía circular y compostaje industrial que cierran el ciclo de materiales.

Planteamiento del ejercicio: Una corriente acuosa de glucosa alimenta un biorreactor de fermentación continua para producir ácido láctico que luego se polimeriza por policondensación para obtener PLA. Como se muestra en la figura 20, el alimento total es 1200 kg h con 30 % en masa de glucosa y 70 % de agua. En el biorreactor la conversión de glucosa es 90 %. La selectividad de ácido láctico frente a etanol es 4 en base a razón molar de formación. El ácido láctico generado pasa a un reactor de policondensación con conversión de monómero a polímero del 95 %. Calcular flujos molares y másicos de todas las especies principales en cada etapa, así como conversión selectividad y rendimientos.

Figura 20. *Representación esquemática del problema con sus datos iniciales.*



Reacción 1: Fermentación deseada láctica

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ C_3H_6O_3$$

Reacción 2: Fermentación indeseada alcohólica

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ C_2H_6O + 2\ CO_2$$

Reacción 3: Policondensación

$$C_3H_6O_3 \rightarrow C_3H_4O_2 + 2\ H_2O\ (unidad\ repetitiva\ del\ PLA + agua)$$

Resolución:

- Bases y datos:

Base de cálculo 1 h
Flujo de alimentación total 1200 kg/h con 30 % masa de glucosa y 70 % de agua
Por lo tanto, glucosa = 360 kg/h; agua = 840 kg/h

Conversión de glucosa en fermentación XG = 90 %

Selectividad de ácido láctico frente a etanol S = nLA formado/ nEtOH formado = 4

Conversión de polimerización de ácido láctico a PLA es de XP = 95 %

Masas molares (Mm) en kg/kmol:

Glucosa ($C_6H_{12}O_6$) = 180.156

Ácido láctico ($C_3H_6O_3$) = 90.078

Etanol (C_2H_6O) = 46.069

Dióxido de carbono (CO_2) = 44.0095

Agua (H_2O) = 18.015

Unidad repetitiva PLA ($C_3H_4O_2$) = 72.0627

ξ se llama extensión de reacción, en un proceso continuo a estado estacionario con base de 1 hora ξ indica cuántos kmoles por hora "avanza" cada reacción química, por lo tanto:

$\xi 1$: extensión de la reacción deseada

$\xi 2$: extensión de la reacción indeseada

Con los coeficientes estequiométricos v_{ij} la ecuación general es:

$$n_{i,salida} = n_{i,entrada} + \Sigma * \upsilon_{ij} * \xi$$

- Conversión de los flujos molares de entrada:

$$nG = F\ glucosa.(Mm\ glucosa)$$

$$nG_en = 360\frac{kg}{h}.\left(180.156\frac{kmol}{kg}\right) = 1.998\ kmol/h\frac{kmol}{h}\ glucosa\ a\ la\ entrada$$

$$nH2O = F\ agua.(Pm\ agua)$$

$$nH2O_en = 840\frac{kg}{h}.\left(18.015\frac{kmol}{kg}\right) = 46.628\frac{kmol}{h}\ agua\ a\ la\ entrada$$

- Defina $\xi 1$ y $\xi 2$ como extensiones en la fermentación:

Conversión de glucosa (XG):

$$XG = \frac{\text{mol de glucosa que reaccionan}}{mol\ de\ glucosa\ alimentados}$$

$$XG = \frac{\xi 1 + \xi 2}{nG_en}$$

$$0.90 = \frac{\xi 1 + \xi 2}{1.998\ kmol/h}$$

$$\xi 1 + \xi 2 = 0.90 * 1.998 \frac{kmol}{h} = 1.798 \frac{kmol}{h}$$

Selectividad (S):

$$S = \frac{n\ La}{n\ EtOH}$$

$$S = \frac{2\ \xi 1}{2\ \xi 2}$$

$$S = \frac{\xi 1}{\xi 2} = 4$$

$$\xi 1 = 4\ \xi 2$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones encontradas de la conversión y la selectividad:

$$\xi 1 + \xi 2 = 1.80\ kmol/h$$

$$\xi 1 = 4\ \xi 2$$

Se tiene entonces,

$$\xi 1 = 1.4388 \frac{kmol}{h}$$

$$\xi 2 = 0.3597 \frac{kmol}{h}$$

- Determinación de las corrientes de salida de la fermentación:

$$n_{salida} = n_{entrada} + \ \Sigma . \nu . \xi$$

Glucosa sin reaccionar:

$$nG_{salida} = 2 \frac{kmol}{h} - \ 1.798 \frac{\mathrm{kmol}}{\mathrm{h}} = 0.1998 \frac{kmol}{h} = 36.00 \frac{kg}{h}$$

Ácido láctico producido:

$$nLa = 2\xi 1$$

$$nLa = 2\left(1.4388\frac{kmol}{h}\right)$$

$$nLa = 2.8775\frac{kmol}{h} = 259.20\frac{kg}{h}$$

Etanol producido:

$$nEtOH = 2\xi 2$$

$$nEtOH = 2\left(0.3597\frac{kmol}{h}\right)$$

$$nEtOH = 0.7194\frac{kmol}{h} = 33.141\frac{kg}{h}$$

Dióxido de carbono producido:

$$nCO_2 = 2\xi 2$$

$$nCO_2 = 2\left(0.3597\frac{kmol}{h}\right)$$

$$nCO_2 = 0.7194\frac{kmol}{h} = 31.659\frac{kg}{h}$$

Agua arrastre del alimento que no reacciona en esta etapa nH_2O:

$$840\frac{kg}{h} = 46.628\frac{kmol}{h}$$

Balance general en el fermentador

Entrada = Salida

$$F = nG_{salida} + nLa + nEtOH + nCO_2 + nH_2O$$

$$1200\frac{kg}{h} = 36\frac{kg}{h} + 259.20\frac{kg}{h} + 33.141\frac{kg}{h} + 31.659\frac{kg}{h} + 840\frac{kg}{h}$$

$$1200\frac{kg}{h} = 1200\frac{kg}{h}$$

- Parámetros de desempeño del fermentador.

Conversión de glucosa XG = 90 %

Selectividad S = 4

Rendimiento molar de ácido láctico (Y_{LAG}) respecto a glucosa reaccionada teórico:

$$Y_{LAG} = \frac{n_{LA}}{2 * n_{G,reac}}$$

$$Y_{LAG} = \frac{2.8775 \frac{kmol}{h}}{2 * 1.798 \frac{kmol}{h}}$$

$$Y_{LAG}(molar) = 0.80 = 80\%$$

Rendimiento másico de LA sobre glucosa alimentada:

$$Y_{LAG}(másico) = \frac{nLa}{nG_en} = \frac{259.20 \frac{kg}{h}}{360 \frac{kg}{h}} = 0.72 = 72.1\%$$

- Polimerización de ácido láctico a PLA:

Alimentación a reacción 3 (R3) es de 2.8775 kmol/h de LA.

Conversión $X_P = 95\%$

Unidades repetitivas de PLA formadas:

$$n_{PLA} = 0.95 * 2.8775 \frac{kmol}{h}$$

$$n_{PLA} = 2.7336 \frac{kmol}{h} = 196.993 \frac{kg}{h}$$

Agua generada en policondensación:

$$n_{H2O,pol} = 2.7336 \frac{kmol}{h} = 49.246 \frac{kg}{h}$$

Ácido láctico no convertido:

$$n_{LA,\ res} = 0.05 * \ 2.8775 \frac{kmol}{h}$$

$$n_{LA,\ res} = 0.1439 \frac{kmol}{h} = 12.960 \frac{kg}{h}$$

Balance general del ácido láctico

Entrada = Salida

$$nLA\ entrada = n_{PLA} + n_{H2O,pol} + n_{LA,\ res}$$

$$259.20\frac{kg}{h} = 196.993\frac{kg}{h} + 49.246\frac{kg}{h} + 12.960\frac{kg}{h}$$

$$259.20\frac{kg}{h} = 259.20\frac{kg}{h}$$

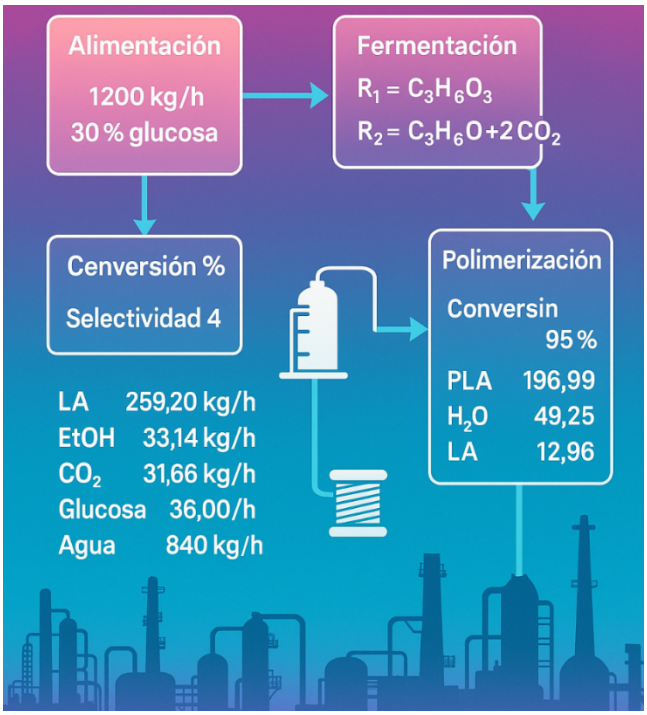
Resumen de respuestas:

Después de la fermentación		
Componente	**kmol/h**	**kg/h**
Glucosa	0.1998	36.00
Ácido láctico	2.8775	259.20
Etanol	0.7194	33.141
Dióxido de carbono	0.7194	31.659
Agua	46.628	840.00

Después de la polimerización		
Corriente	**kmol/h**	**kg/h**
PLA	2.7336	196.993
Agua generada	2.7336	49.246
Ácido láctico residual	0.1439	12.960

En la figura 21, se presenta un diagrama de los resultados que se obtuvieron del ejercicio 5.

Figura 21. *Representación esquemática del problema con las respuestas.*



Actividad de aprendizaje

Objetivo: Aplicar los principios del balance de materia en sistemas con reacción química, identificando la conversión de reactivos, el rendimiento de productos y el impacto de la estequiometría en los flujos de entrada y salida.

Instrucciones:

Lee cuidadosamente cada pregunta. Utiliza como referencia un proceso con reacción química conocido (por ejemplo, la producción de etanol a partir de glucosa, la síntesis de amoníaco, la combustión de un combustible, o la hidrólisis de un compuesto) y resuelve el análisis completo, apoyándote en el contenido del capítulo.

Parte A. Comprensión teórica

1. ¿Cuál es la diferencia principal entre un balance de materia con reacción y uno sin reacción química?
2. ¿Qué papel cumple la estequiometría en el planteamiento de balances de materia con reacción química?
3. Define los siguientes términos y menciona su importancia en un proceso con reacción química:
    - Reactivo limitante
    - Reactivo en exceso
    - Conversión
    - Rendimiento
    - Selectividad

Parte B. Aplicación práctica a un proceso con reacción

4. Selecciona un proceso con reacción química (puede ser uno industrial, laboratorial o propuesto por el docente). Describe brevemente el proceso y su ecuación química global balanceada.
5. Identifica y clasifica el sistema (abierto, cerrado o aislado) y el tipo de operación (continuo o por lotes). Justifica tu respuesta.
6. Elabora un diagrama de flujo del proceso con las corrientes de entrada, salida y las variables disponibles (flujo molar, composición, temperatura, etc.).
7. Determina cuál es el reactivo limitante, si existe un reactivo en exceso, y calcula el porcentaje de conversión del reactivo limitante.
8. Plantea el balance de materia global del sistema y luego realiza un balance por componentes clave (al menos dos: un reactivo y un producto).
9. Si el proceso genera productos secundarios o reacciones paralelas, calcula la selectividad y el rendimiento del producto deseado.

10. Calcula las cantidades molares o másicas de reactivos consumidos y productos formados en estado estacionario.

Parte C. Reflexión crítica

11. ¿Por qué es esencial calcular conversión y rendimiento en los procesos industriales que involucran reacciones químicas?
12. ¿Qué dificultades encontraste al hacer balances con reacción y cómo las resolverías en un entorno profesional? ¿Cómo te ayuda este análisis a tomar decisiones más sustentables y seguras en la industria?

Sugerencia docente: Puedes evaluar esta actividad con una rúbrica sencilla basada en: comprensión conceptual, aplicación correcta, claridad del diagrama y profundidad en la reflexión.

Cierre y Conexión:

En este capítulo III incorporaste reacciones simples y múltiples, paralelas y consecutivas, con inertes y reciclos; formulaste balances por especie con coeficientes estequiométricos, resolviste extensiones de reacción y consolidaste métricas de desempeño que permiten cuantificar decisiones de operación y de diseño a nivel de reactor.

En el capítulo IV llevaremos estos modelos a herramientas computacionales para automatizar cálculos explorar sensibilidad documentar resultados y preparar informes reproducibles que faciliten revisión entre pares y transferencia de conocimiento en planta. Las aplicaciones abarcan fermentaciones para ácido láctico y bioplásticos, combustión y oxidación selectiva, síntesis catalítica e hidrotratamiento, donde la conversión el rendimiento y la selectividad guían la elección de condiciones de operación y de estrategias de separación aguas.

Referencias bibliográficas

Boyacá Mendivelso, L. A. (2019). *Balance de materia orientado a procesos* ((ed.). Ed). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/189655

Chen, C.-T. (2022). *MATLAB Applications in Chemical Engineering*. Chyi-Tsong Chen. https://books.google.com/books?id=kpxwEAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=MATLAB+Applications+in+Chemical+Engineering&hl=es&newbks=1&newbks_redir=1&sa=X&ved=2ahUKEwiMxrn5v8mPAxWMRzABHWMNJxkQ6AF6BAgNEAM

Clough, D. E. (2016). Use Spreadsheets for excel para ingenieria quimica. *Chemical Engineering Progress*, *August*, 25–34. https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20160825_0.pdf

Dhagat, S., Jujjavarapu, S. E., Kumar, N. S. S., & Mahapatra, C. (2024). *Recent Advances in Bioprocess Engineering and Bioreactor Design*. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-97-1451-3

Felder, Richard; Rousseau, R. (2003). *Principios elementales de los procesos químicos* (Limusa Wil). https://hdquimicaeiqtotalh.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/10/libro-de-balance-felder.pdf

Fito Suñer, P. J. Castelló Gómez, M. L. & Tarrazó Morell, J. (2023). *Balances de materia y energía en ingeniería de bioprocesos: (2 ed.)* (Editorial). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/238439

Galagovsky, L., & Giudice, J. (2015). Estequiometría y ley de conservación de la masa: una relación a analizar desde la perspectiva de los lenguajes químicos. *Ciência & Educação (Bauru)*, *21*(1), 85–99. https://doi.org/10.1590/1516-731320150010006

Gallego, M. (2019). *Excel 2019: avanzado: (1 ed.).* (RA-MA Edit). https://books.google.com.ec/books?id=78y4EAAAQBAJ&pg=PT4&dq=Excel+2019:+avanzado:+(1+ed.).&hl=es&newbks=1&newbks_redir=1&sa=X&ved=2ahUKEwi_7tfBwMmPAxW1RjABHWi2GF0Q6AF6BAgNEAM

Garavito, N. G. (2007). *Balance De Materia Libro Guía De Clase*. 1–3. https://www.academia.edu/36750523/BALANCE_DE_MATERIA_LIBRO_GUÍA_DE_CLASE_NÉSTOR_GOODING_GARAVITO

Himmelblau, D. M. (1997). *Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química* (PRENTICE-H). https://celqusb.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/01/principios-bc3a1sicos-y-cc3a1lculos-e-ingenieria-quc3admica-himmelblau-6ed.pdf

Maroto Valiente, Á. & Muñoz Andrés, V. (2013). *Operaciones unitarias y reactores químicos* (UNED-Uni). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/48624

Martín, M. M. (2025). *Introduction to software for chemical engineers*. CRC Press. https://books.google.com.ec/books?id=MlpEEQAAQBAJ&pg=PT607&dq=Introduction+to+software+for+chemical+engineers&hl=es&newbks=1&newbks_redir=1&sa=X&ved=2ahUKEwjAw8yKwMmPAxWWRjABHQ0WNnkQ6AF6BAgNEAM

Matlab, L. (2021). MATLAB & Simulink. *Retrieved September*. https://www.mathworks.com/products/matlab.html

Monsalvo Vázquez, R. & M. del R. R. S. (2015). *Balance de materia y energía: procesos industriales* (Editorial). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/39426

Nandagopal, N. S. (2023). *Chemical engineering principles and applications*. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-27879-2

Rojas González, A. F. (2012). *Fundamentos de procesos químicos* (Universida). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/127951

Rosas-Martínez, J. M., Valero-Romero, M. J., García-Mateos, F. J., Ruiz-Rosas, R. R., Rodríguez-Mirasol, J., & Cordero-Alcántara, T. (2022). Resolución de problemas modelo de Ingeniería Química usando MATLAB. *VI Congreso de Innovación Docente En Ingeniería Química*. https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/24752/T3_Poster_Flash_Rosas.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Zapata, A., & Artbox, E. (2012). BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA. Formulación, solución y usos en Procesos Industriales. In *BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA. Formulación, solución y usos en Procesos Industriales. Corregida y aumentada*. https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/46c24dcb-d457-41eb-83eb-01da1ff62489/content

CAPÍTULO IV. Aplicaciones Computacionales para la Resolución de Balances de Materia con Microsoft Excel y MATLAB

Objetivos de aprendizaje:

- Familiarizarse con el entorno y las herramientas básicas de Microsoft Excel y MATLAB aplicadas al análisis de sistemas de ingeniería química.
- Utilizar funciones matemáticas, lógicas y gráficas en Excel para resolver balances de materia sin y con reacción química.
- Integrar el uso de herramientas computacionales en la solución de problemas reales de balances de materia en estado estacionario y transitorio.

Resultados de aprendizaje:

- El estudiante reconoce las principales funciones y estructuras de cada software, configurando adecuadamente hojas de cálculo en Microsoft Excel y scripts básicos en MATLAB para el análisis numérico de balances de materia.
- El estudiante aplica funciones para modelar sistemas de mezclas, separaciones y reacciones en hojas de cálculo automatizadas.
- El estudiante modela y simula problemas reales como mezclas multicomponente, reactores con conversión parcial y procesos acoplados, empleando hojas de cálculo dinámicas o scripts personalizados.

En este capítulo se presentan herramientas computacionales aplicadas a la resolución de balances de materia en el área de ingeniería química: Los programas seleccionados para desarrollar los ejercicios de aplicación son Microsoft Excel y MATLAB. Se ha escogido estos programas por su accesibilidad y versatilidad. Ambos programas permiten desarrollar cálculos automatizados, establecer modelos matemáticos, representar sistemas de ecuaciones, visualizar

resultados, facilitando el aprendizaje y la aplicación de principios fundamentales en ingeniería química.

El uso de herramientas computaciones para resolver ejercicios de balance de materia en Ingeniería Química es fundamental por varias razones clave, tanto educativas como profesionales (Martín, 2025). A continuación, se detalla su importancia:

a) **Automatización y precisión de cálculos.**

Los ejercicios de balance de materia suelen involucrar múltiples ecuaciones, fracciones másicas, conversiones de unidades, y cálculos iterativos. Las computadoras, mediante software, permiten realizar estos cálculos de manera rápida, precisa y sin errores humanos por redondeo o transcripción.

b) **Facilita el análisis de sistemas complejos.**

En problemas con múltiples corrientes, reciclajes, derivaciones o etapas sucesivas, las herramientas computacionales permiten modelar el sistema de manera integral, visualizar las interrelaciones y aplicar cambios para observar cómo afectan al conjunto.

c) **Ahorro de tiempo y aumento de productividad.**

La resolución manual de balances puede ser lenta, especialmente en escenarios de simulación o diseño. Con herramientas como Excel o MATLAB, entre otras, se puede estructurar una plantilla o script y reutilizarlo para múltiples escenarios, lo que acelera significativamente el trabajo del ingeniero.

d) **Visualización y comunicación de resultados.**

Las computadoras permiten crear gráficos, tablas dinámicas y reportes automáticos que facilitan la interpretación de los resultados, la toma de decisiones y la presentación a equipos interdisciplinarios.

e) **Desarrollo de competencias digitales profesionales.**

El dominio de software técnico es una competencia exigida en la industria moderna. Al integrar estos programas en la formación académica, los estudiantes adquieren habilidades valiosas que aumentan su empleabilidad y capacidad para enfrentar retos reales de ingeniería.

f) **Simulación y optimización de procesos.**

Las herramientas computacionales permiten simular escenarios hipotéticos o condiciones de operación extremas. Esto es útil para optimizar el uso de materia prima, minimizar residuos, o aumentar el rendimiento de un proceso, todo sin necesidad de realizar ensayos experimentales costosos o peligrosos.

g) **Interfaz con herramientas industriales y de simulación avanzada.**

Excel y MATLAB sirven como puertas de entrada al uso de simuladores más complejos como Aspen Plus, COMSOL, o DWSIM, que se utilizan en plantas reales. Su aprendizaje es un paso previo natural hacia un entorno de modelado avanzado.

4.1. Microsoft Excel

Microsoft Excel (en la figura 22 se observa el ícono del software) es un programa de hoja de cálculo desarrollado por Microsoft y lanzado por primera vez en 1985. Desde entonces, ha evolucionado hasta convertirse en una herramienta fundamental en el ámbito académico, empresarial e industrial. Su desarrollo marcó un hito en la gestión de datos y automatización de cálculos.

Excel permite organizar, manipular y analizar grandes volúmenes de datos numéricos y alfanuméricos mediante un entorno de celdas dispuestas en filas y columnas (Gallego, 2019).

Figura 22. Ícono de Microsoft Excel

Cada celda puede contener valores, fórmulas o funciones predefinidas. Los usuarios pueden aplicar funciones matemáticas, estadísticas, lógicas y financieras, crear gráficos dinámicos, usar filtros y tablas dinámicas para análisis exploratorios, y automatizar tareas repetitivas mediante macros. Su interfaz gráfica es amigable y de fácil acceso, lo que permite que usuarios con distintos niveles de experiencia puedan utilizarlo eficientemente.

Una de sus mayores ventajas es su capacidad para ejecutar cálculos en tiempo real con actualización automática de resultados al modificar los datos de entrada. Esto convierte a Excel en una herramienta poderosa para validar modelos, simular escenarios, realizar estimaciones y presentar resultados de manera clara. Además, su compatibilidad con otros programas del paquete Microsoft Office y su uso extendido en la industria lo convierten en un recurso clave para ingenieros y científicos.

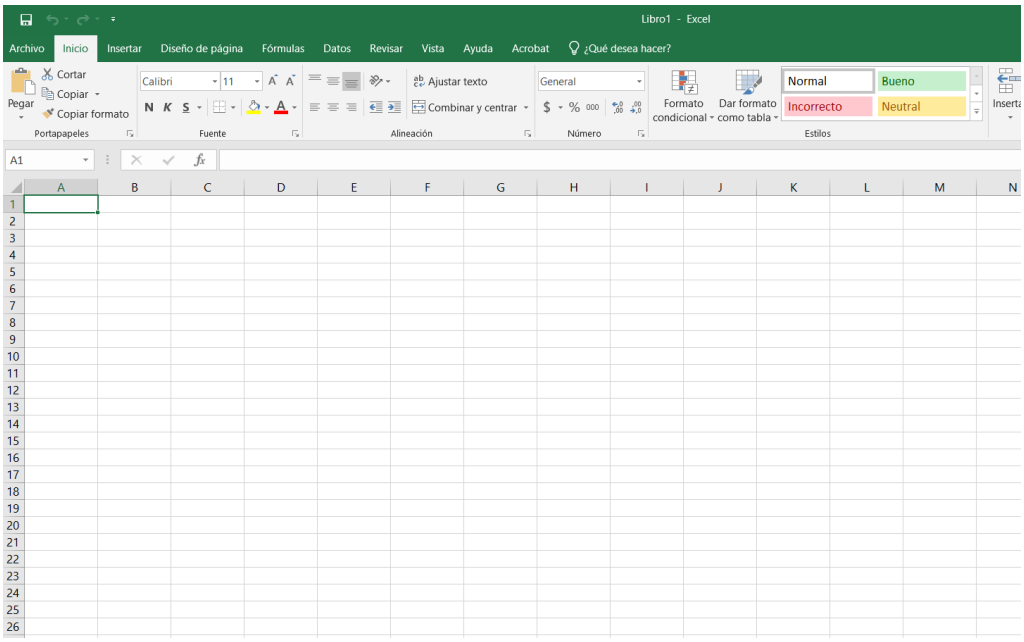
En el campo de la ingeniería química, Excel se emplea ampliamente para resolver balances de materia y energía, realizar cálculos de diseño de reactores, analizar datos experimentales, simular procesos por etapas y modelar flujos de

producción. Su uso en cursos de ingeniería facilita a los estudiantes el desarrollo del pensamiento lógico y cuantitativo al aplicar herramientas digitales a problemas reales. Algunas de las aplicaciones en Ingeniería Química incluyen (Clough, 2016):

- Cálculo de flujos másicos en sistemas continuos y discontinuos.
- Modelado de procesos por etapas.
- Simulación de mezclas y separaciones simples.

A continuación, la siguiente Figura 23 muestra el entorno gráfico de Microsoft Excel

Figura 23. Entorno visual de Microsoft Excel



4.2. MATLAB

MATLAB (Matrix Laboratory) es un entorno de programación orientado al cálculo numérico y análisis de datos. En el área de ingeniería química, es una

herramienta poderosa que permite resolver ecuaciones algebraicas y diferenciales, optimizar procesos y simular sistemas complejos. Su funcionamiento es basado en una calculadora de matrices, pero dada la amplia variedad de funciones generales y especializadas disponibles, así como sus sólidas capacidades gráficas, su entorno permite una infinidad de aplicaciones acorde a las necesidades de cada problema (figura 24) (Chen, 2022).

Figura 24. Ícono de MATLAB

MATLAB utiliza un lenguaje de programación propio, similar a otros usados en cálculo numérico (como Fortran o C). Esto permite al usuario crear scripts (secuencias de comandos almacenadas en archivos) para resolver problemas específicos de forma automatizada, además de desarrollar algoritmos personalizados o funciones nuevas que pueden integrarse fácilmente a sus programas. También permite organizar y estructurar mejor la solución de problemas complejos (Rosas-Martínez *et al.,* 2022).

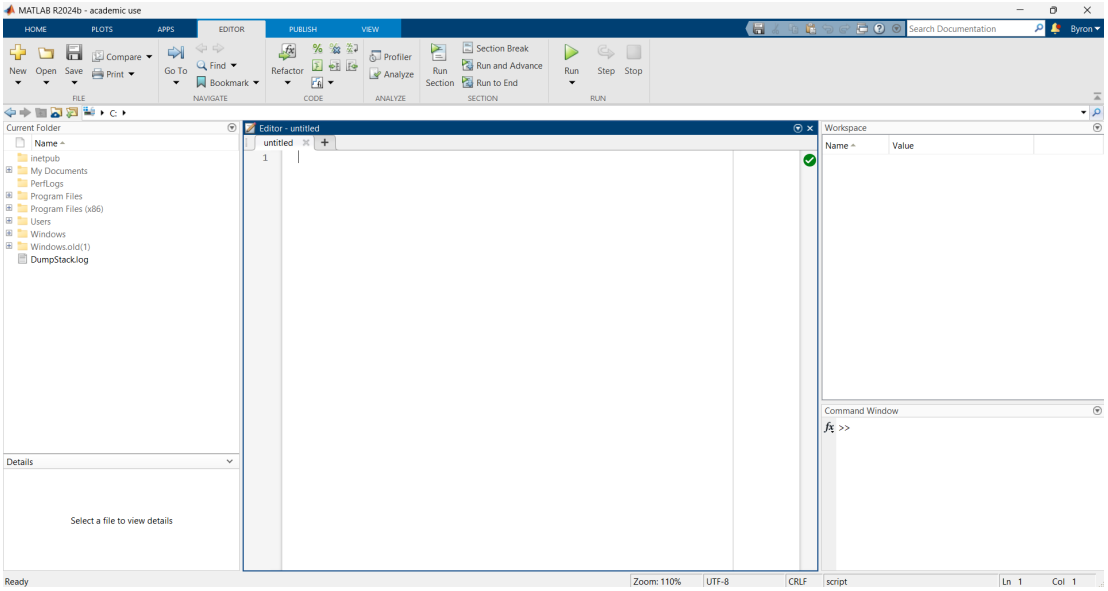
El software cuenta con múltiples paquetes o aplicaciones adicionales con funciones especializadas que amplían sus capacidades. Además, existe una comunidad global que comparten conocimientos, accesibles desde el sitio web oficial de MathWorks. Algunas de las aplicaciones en Ingeniería Química incluyen (Matlab, 2021):

- Resolución de sistemas de ecuaciones no lineales.
- Modelado dinámico de reactores.

- Automatización de cálculos de balance de masa.

A continuación, en la figura 25 se muestra el entorno visual de MATLAB.

Figura 25. Entorno visual de MATLAB



4.2.1. Operaciones elementales en MATLAB

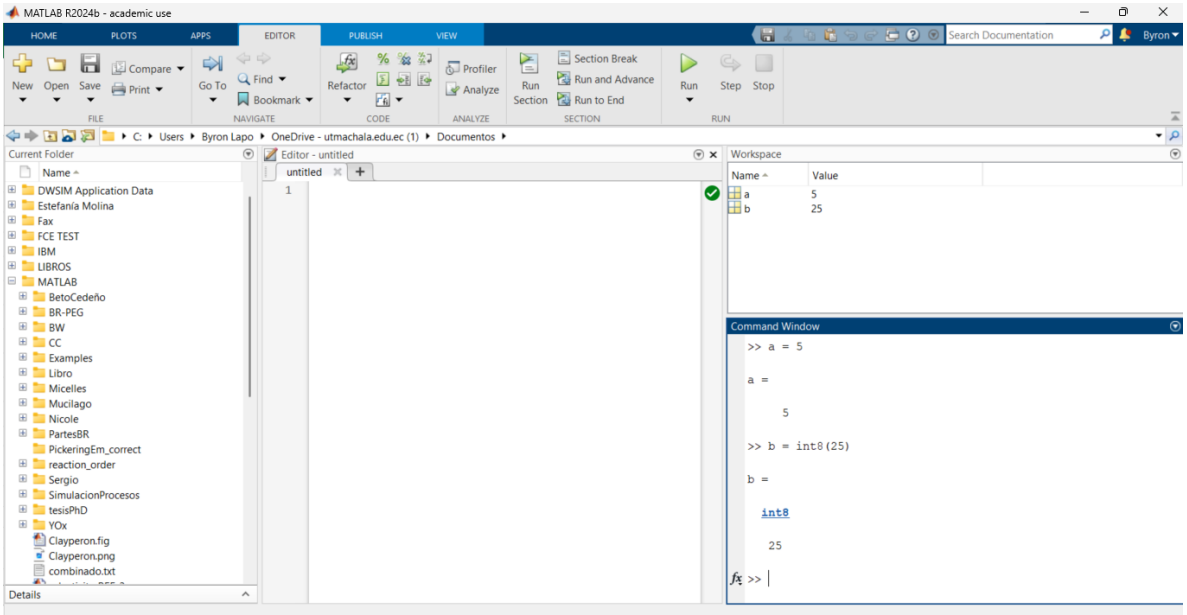
En MATLAB, los datos se organizan en variables que pueden tomar distintos tipos. A continuación, se presentan los principales tipos de datos y ejemplos de cómo se declaran o utilizan:

- Números enteros. Los enteros pueden asignarse directamente, aunque MATLAB por defecto los maneja como tipo double.

```
a = 5;              % número entero

b = int8(25);  % entero de 8 bits con signo
```

En la figura 26 se puede observar en la subventana 'Command Window' el ingreso de las asignaciones para las variables 'a' y 'b', las mismas que son almacenadas en la subventana 'Workspace' en archivos de espacio de trabajo (mat) a y b respectivamente.

Figura 26. Subventana 'Command Window' de MATLAB



- Números reales. Son los números con decimales, representados por tipo

```
x = 3.14;

y = -7.21;
```

double.

- Lógicos. Representan valores booleanos: verdadero (true) o falso (false).

```
flag = true;

comparación = (5 > 3); % devuelve true
```

Caracteres. Un solo carácter se representa entre comillas simples.

- Números complejos. Se definen con la notación i o j.

```
z = 3 + 4i;
letra = 'A';
```

- Cadenas de caracteres. Usan comillas dobles (disponible desde versiones recientes).

```
mensaje = "Bienvenido a MATLAB";
```

- Matrices. Son estructuras fundamentales. Una matriz puede tener una sola fila (vector fila) o una sola columna (vector columna), o ser bidimensional.
- Suma, Resta, Multiplicación y División

```
a = 10;

b = 3;

suma = a + b;

resta = a - b;

producto = a * b;

division = a / b;   % división normal
```

- Potencias y raíces

```
cuadrado = a^2;

raiz = sqrt(a);

div_elemento = a ./ b; % división elemento a elemento
```

- Operadores racionales y lógicos

```
sen = sin(pi/4);

logaritmo = log(10);   % logaritmo natural

exponencial = exp(1);  % e^1

div_elemento = a ./ b; % división elemento a elemento
```

- Funciones matemáticas comunes

```
x = 5;

y = 8;

igual = (x == y);

mayor = (x > y);

no_igual = (x ~= y);

logico = (x < y) && (x ~= 0);  % AND lógico

div  elemento = a ./ b; % división elemento a elemento
```

4.3. Ejercicios desarrollados en Excel y MATLAB sobre Balance de Materia

Ejercicio 6.

Una solución acuosa de hidróxido de potasio contiene 30.0 % de KOH por masa. Se desea producir una solución de KOH al 5.0 % diluyendo la corriente de la solución al 30% con una corriente de agua pura. Calcule las proporciones (Kg de H_20/Kg solución de alimentación) y (Kg solución del producto/Kg solución de alimentación).

Solución en Microsoft Excel:

Para la resolución del presente ejercicio en Excel, se presentarán una secuencia de capturas de pantalla, que comprenden desde la figura 27 hasta la figura 30.

La hoja de Excel "Ejercicio6" muestra una forma automatizada de realizar este cálculo en Microsoft Excel, acorde a los siguientes pasos:

1. Se introducen los datos conocidos de entrada (figura 27).:

Figura 27. Captura de pantalla del listado de datos en Excel

6	**Datos de entrada:**	
7	**Concentración de NaOH en la alimentación (%):**	30
8	**Concentración de NaOH en el producto (%):**	5
9	**Alimentación (Kg/h):**	5000

2. Se plantean las ecuaciones, tal como se muestran en la figura 28:

Figura 28. Captura de pantalla de las ecuaciones en Excel

D
Ecuaciones
$F + A = C$
$FX_{F[NaOH]} + AX_{A[NaOH]} = CX_{C[NaOH]}$
$FX_{F[H2O]} + AX_{A[H2O]} = CX_{C[H2O]}$

F = alimentación (Kg/h)
A = Agua (Kg/h)
C = Producto (Kg/h)
$X_{F[NaOH]}$: concentración de NaOH en la alimentación en fracción (%/100)
$X_{F[H2O]}$: concentración de Agua en la alimentación en fracción (%/100)
$X_{A[NaOH]}$: concentración de NaOH en el agua o solvente en fracción (%/100)
$X_{A[H2O]}$: concentración de Agua en el solvente en fracción (%/100)
$X_{C[NaOH]}$: concentración de NaOH en el producto en fracción (%/100)
$X_{C[H2O]}$: concentración de Agua en el producto en fracción (%/100)

3. Se calculan los coeficientes según como se observa en la figura 29:

Figura 29. Coeficientes y datos de las variables del ejercicio en Excel

Datos:	
F (Kg/h):	5000
A (Kg/h):	25000
C (Kg/h):	30000
$X_{F[NaOH]}$	0.3
$X_{F[H2O]}$	0.7
$X_{A[NaOH]}$	0
$X_{A[H2O]}$	1
$X_{C[NaOH]}$	0.05
$X_{C[H2O]}$	0.95

Datos:	
F (Kg/h):	5000
A (Kg/h):	25000
C (Kg/h):	=((G3*G6))/G10
$X_{F[NaOH]}$	0.3
$X_{F[H2O]}$	0.7
$X_{A[NaOH]}$	0
$X_{A[H2O]}$	1
$X_{C[NaOH]}$	0.05
$X_{C[H2O]}$	0.95

Datos:	
F (Kg/h):	5000
A (Kg/h):	=+G5-G3
C (Kg/h):	30000
$X_{F[NaOH]}$	0.3
$X_{F[H2O]}$	0.7
$X_{A[NaOH]}$	0
$X_{A[H2O]}$	1
$X_{C[NaOH]}$	0.05
$X_{C[H2O]}$	0.95

4. Se reportan los resultados según como se visualiza en la figura 30.

Figura 30. Reporte de respuestas en Excel

12	**Soluciones:**	
13	Agua requerida (Kg/h)	25000
14	Producto obtenido (Kg/h)	30000
15	Kg H_2O/kg solución de alimentación:	5
16	Kg de solución producto/Kg de solución de alimentación:	6

Utilizando la hoja de Excel pueden calcularse las soluciones cambiando los datos de entrada de F, $X_{F[NaOH]}$, $X_{C[NaOH]}$. Además, puede utilizarse para realizar otros cálculos que involucre diluciones.

Resolución en MATLAB:

Para la resolución del presente ejercicio en MATLAB, se presentarán una secuencia de capturas de pantalla, que comprenden desde la figura 31 hasta la figura 33.

Se puede utilizar el siguiente script (ver figura 31):

Figura 31. Script del ejercicio en MATLAB

Ejercicio1.m

```
% Planteamiento
% Una solución acuosa de hidróxido de potasio contiene 30.0 % de KOH
% por masa. Se desea producir una solución de KOH al 5.0 % diluyendo
% la corriente de la solución al 30% con una corriente de agua pura.
% Calcule las proporciones (Kg de H20/Kg solución de alimentación)
% y (Kg solución del producto/Kg solución de alimentación).
clear;
clc;

% datos de entrada:
Alimentacion = 5000; % Alimentación F
X_F_NaOH = 30; % concentración de NaOH en la entrada (%)
X_F_H2O = 70; % concentración de H2O en la entrada (%)
X_P_NaOH = 5; % concentración de NaOH en el producto (%)

% Porcentajes en masa
x_F_NaOH = X_F_NaOH/100; % fracción másica de KOH en la alimentación
x_F_H2O = X_F_H2O/100;
x_P_NaOH = X_P_NaOH/100;

Producto =  Alimentacion*x_F_NaOH/x_P_NaOH;
H2O_requerida = Producto - Alimentacion;

% Calcular proporciones
kg_H2O_por_kg_alimentacion = H2O_requerida/Alimentacion;
kg_producto_por_kg_alimentacion = Producto/Alimentacion;

% Mostrar resultados
fprintf('Agua requerida: %.2f kg\n', H2O_requerida);
fprintf('Produto producido: %.2f kg\n', Producto);
fprintf('kg H2O por kg de alimentación requeridos: %.2f kg/kg\n', kg_H2O_por_kg_alimentacion);
fprintf('kg de producto por kg de alimentación: %.2f kg/kg\n', kg_producto_por_kg_alimentacion);
```

Visualización de resultados en Workspace (ver figura 32)

Figura 32. Captura de pantalla de MATLAB con los resultados de Workspace

Workspace

Name	Value
Alimentacion	5000
H2O_requerida	25000
kg_H2O_por_kg_aliment...	5
kg_producto_por_kg_ali...	6
Producto	30000
x_F_H2O	0.7000
X_F_H2O	70
x_F_NaOH	0.3000
X_F_NaOH	30
x_P_NaOH	0.0500
X_P_NaOH	5

En la figura 33, se observa los resultados en Command Window del ejercicio:

Figura 33. Resultados del ejercicio resuelto en MATLAB

```
Command Window
Agua requerida: 25000.00 kg
Produto producido: 30000.00 kg
kg H2O por kg de alimentación requeridos: 5.00 kg/kg
kg de producto por kg de alimentación: 6.00 kg/kg
fx >>
```

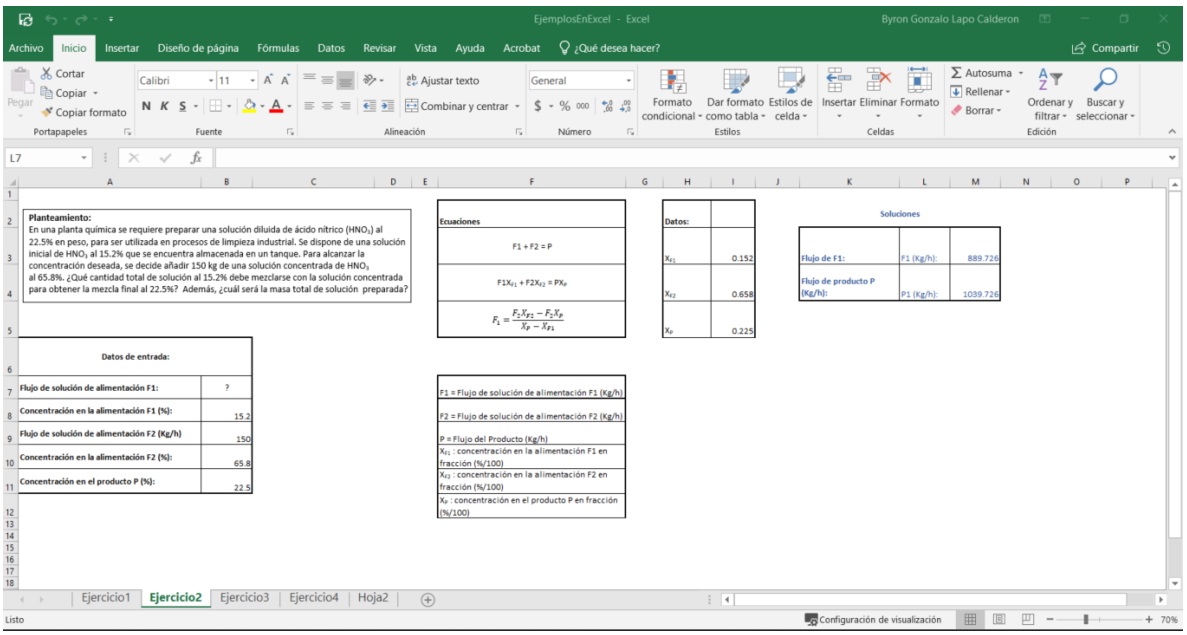
Ejercicio 7:

En una planta química se requiere preparar una solución diluida de ácido nítrico (HNO_3) al 22.5% en peso, para ser utilizada en procesos de limpieza industrial. Se dispone de una solución inicial de HNO_3 al 15.2% que se encuentra almacenada en un tanque. Para alcanzar la concentración deseada, se decide añadir 150 kg de una solución concentrada de HNO_3 al 65.8%. ¿Qué cantidad total de solución al 15.2% debe mezclarse con la solución concentrada para obtener la mezcla final al 22.5%? Además, ¿cuál será la masa total de solución preparada?

Solución en Excel.

En las siguientes captures (figuras 34 – 38) se muestran una hoja de cálculo de Microsoft Excel desarrollada para el cálculo automatizado del presente ejercicio de dilución. La misma se puede encontrar en la hoja "Ejercicio7" en el archivo digital de Microsoft Excel "EjemplosEnExcel" parte de este libro.

Figura 34. Captura de pantalla de Excel con los datos del ejercicio 7.



Para su uso, siga los siguientes pasos:

- Ingresar los datos de entrada.

Figura 35. Captura de pantalla de los datos de entrada del ejercicio en Excel

6	Datos de entrada:	
7	Concentración en la alimentación F1 (%):	15.2
8	Flujo de solución de alimentación F2 (Kg/h)	150
9	Concentración en la alimentación F2 (%):	65.8
10	Concentración en el producto P (%):	22.5

F1 y P no aparecen en esta sección, ya que son las incógnitas por resolver.

- Utilizar las ecuaciones provenientes del balance de masa:

Figura 36. Captura de pantalla de las ecuaciones y variables del ejercicio en Excel

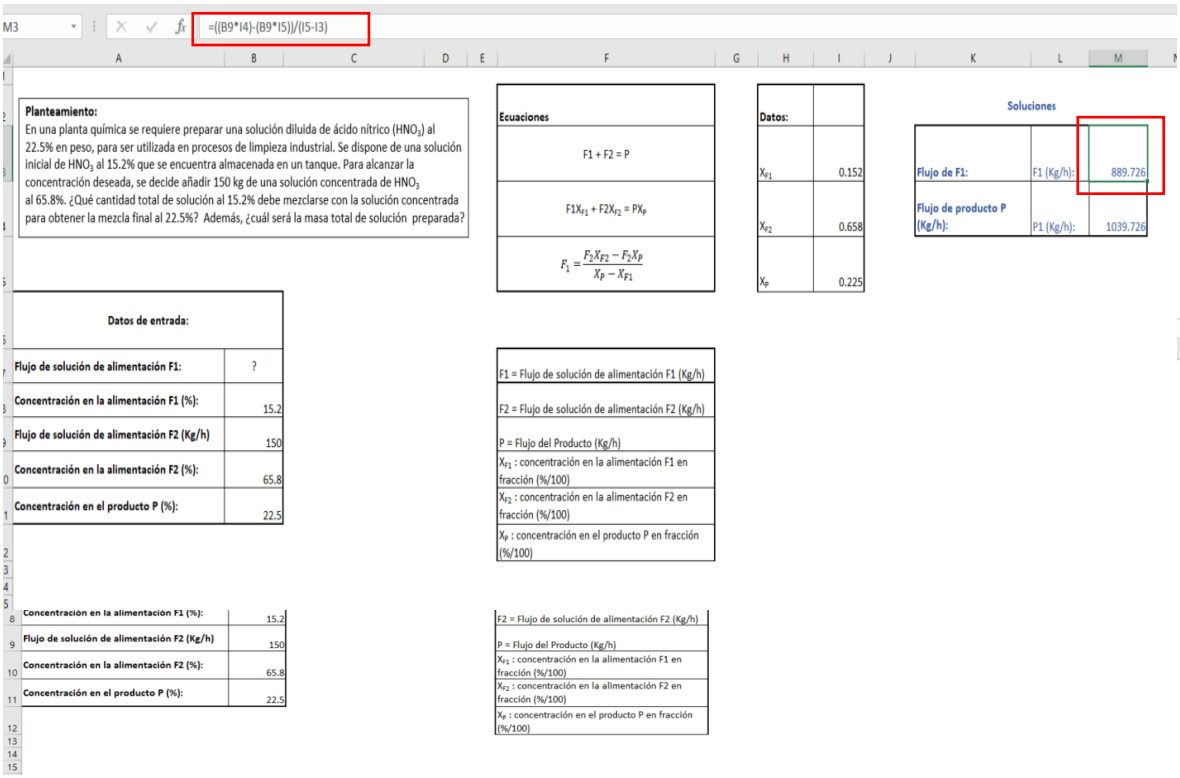
Ecuaciones
$F1 + F2 = P$
$F1X_{F1} + F2X_{F2} = PX_P$
$F_1 = \frac{F_2X_{F2} - F_2X_P}{X_P - X_{F1}}$

F1 = Flujo de solución de alimentación F1 (Kg/h)
F2 = Flujo de solución de alimentación F2 (Kg/h)
P = Flujo del Producto (Kg/h)
X_{F1} : concentración en la alimentación F1 en fracción (%/100)
X_{F2} : concentración en la alimentación F2 en fracción (%/100)
X_P : concentración en el producto P en fracción (%/100)

- Calcular las soluciones acorde a las siguiente aplicación de ecuaciones en Microsoft Excel:

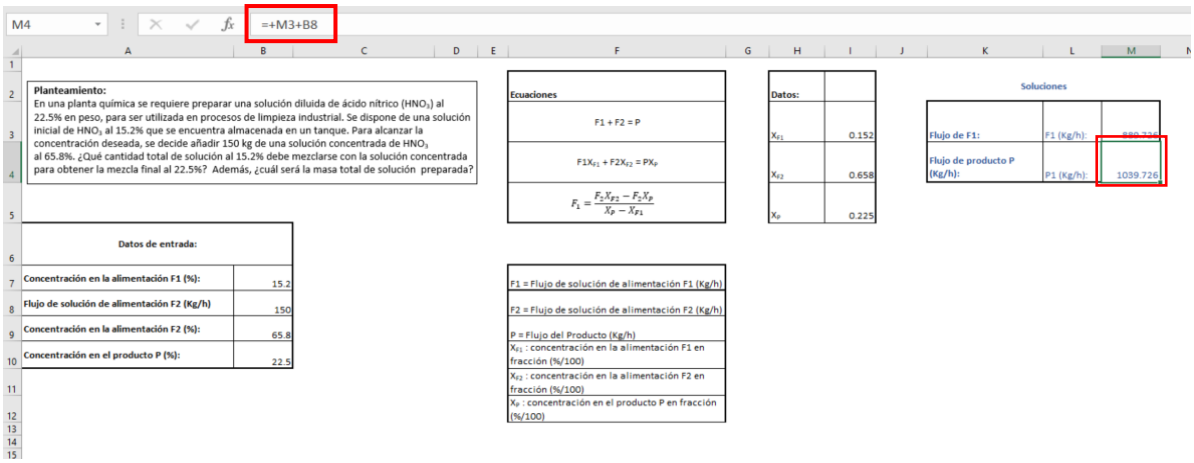
El capture que se muestra en la figura 37 la aplicación del cálculo para la resolución de F1:

Figura 37. Captura de pantalla del cálculo de la corriente F1 en Excel



El siguiente capture de la figura 38 muestra el cálculo para la resolución de P:

Figura 38. Captura de pantalla del cálculo de la corriente P en Excel



Resolución en MATLAB

Para la resolución del presente ejercicio en MATLAB, se presentarán una secuencia de capturas de pantalla, que comprenden desde la figura 39 hasta la figura 40.

Se crea el script (figura 39), ingresando los datos de todas las corrientes que intervienen en el sistema.

Figura 39. Captura de pantalla Script del ejercicio en MATLAB

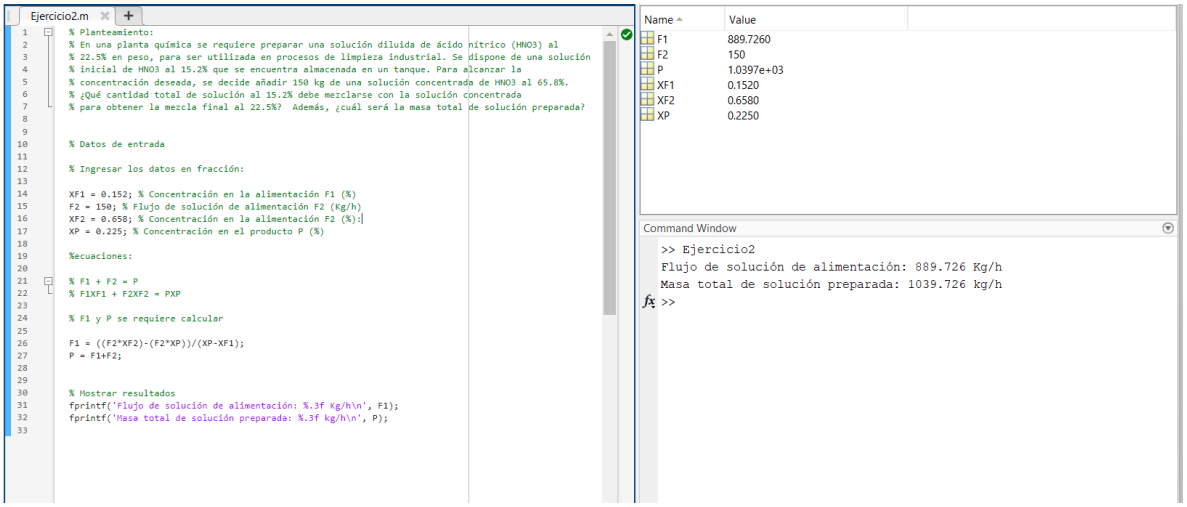
Editor - C:\Users\Byron Lapo\OneDrive - utmachala.edu.ec (1)\ProduccionCientifica\Artículos en proceso\2025\Libro\...

Ejercicio2.m

```
% Planteamiento:
% En una planta química se requiere preparar una solución diluida de ácido nítrico (HNO3) al
% 22.5% en peso, para ser utilizada en procesos de limpieza industrial. Se dispone de una solución
% inicial de HNO3 al 15.2% que se encuentra almacenada en un tanque. Para alcanzar la
% concentración deseada, se decide añadir 150 kg de una solución concentrada de HNO3 al 65.8%.
% ¿Qué cantidad total de solución al 15.2% debe mezclarse con la solución concentrada
% para obtener la mezcla final al 22.5%?  Además, ¿cuál será la masa total de solución preparada?


% Datos de entrada

% Ingresar los datos en fracción:

XF1 = 0.152; % Concentración en la alimentación F1 (%)
F2 = 150; % Flujo de solución de alimentación F2 (Kg/h)
XF2 = 0.658; % Concentración en la alimentación F2 (%):
XP = 0.225; % Concentración en el producto P (%)

%ecuaciones:

% F1 + F2 = P
% F1XF1 + F2XF2 = PXP

% F1 y P se requiere calcular

F1 = ((F2*XF2)-(F2*XP))/(XP-XF1);
P = F1+F2;


% Mostrar resultados
fprintf('Flujo de solución de alimentación: %.3f Kg/h\n', F1);
fprintf('Masa total de solución preparada: %.3f kg/h\n', P);
```

El resultado del ejercicio resuelto en MATLAB se visualiza en la figura 40 en Command Window.

Figura 40. Captura de pantalla de los resultados del ejercicio en MATLAB

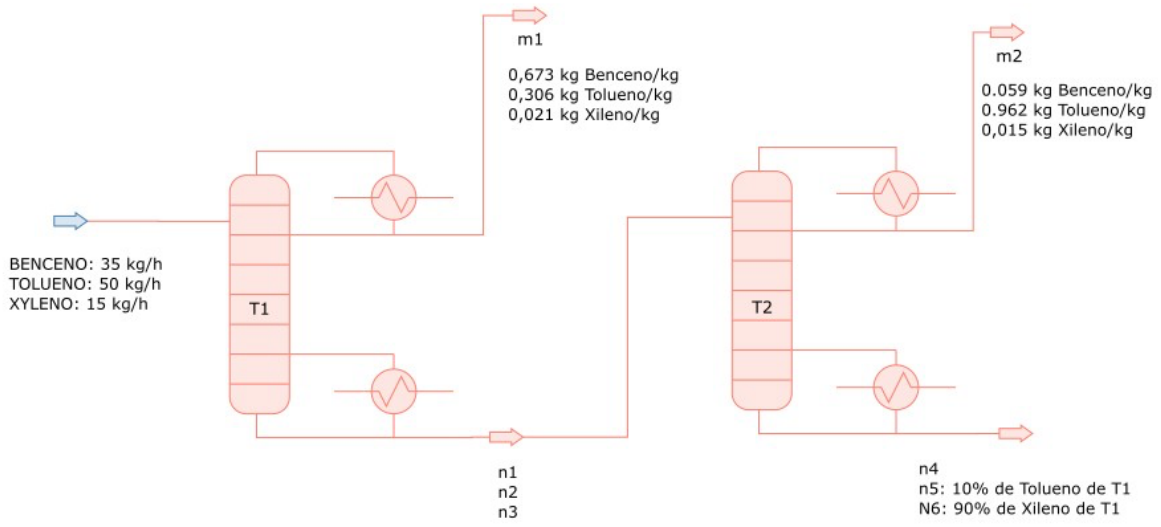


Ejercicio 8:

La figura 41 muestra dos columnas de destilación, T1 y T2 que son usadas para la separación de una línea de proceso que contiene una mezcla de benceno, tolueno y xileno con flujos conocidos (Felder y Rousseau, 2003). El producto de fondo de la columna T1 alimenta a la columna T2. Los caudales de los productos de cabeza de ambas columnas (m_1 y m_2) son desconocidos, pero sus composiciones son conocidas. Además, se indica que el 10,0% del tolueno y el 90,0% del xileno que ingresan a la columna T1 se recuperan como productos de fondo de la columna T2. Todas las variables desconocidas, es decir, los caudales de los productos de cabeza (m_1 y m_2) y los caudales de los componentes de los productos de fondo ($n_1 - n_6$) están etiquetados en la Figura 41. Se pide:

- Determinar los grados de libertad del sistema.
- Determinar las composiciones de las corrientes de vapor y líquido de salida de cada columna.

Figura 41. Representación esquemática del ejercicio 8: Columnas de destilación



Solución:

1. La Figura 41 indica que hay cuatro variables desconocidas (n_{var}) entre las corrientes de entrada y salida de la columna T1, es decir, m_1, n_1, n_2, n_3. Dado que se debe realizar un balance molecular para benceno, tolueno y xileno, se pueden escribir tres balances independientes de especies moleculares (n_{mol}). Por lo tanto, su número de grados de libertad (n_{df}) se determina utilizando la Ecuación (1) como 1 (es decir, 4 – 3). En otras palabras, se debe especificar una de las variables desconocidas (m_2, n_1, n_2 o n_3) (como variable de diseño) antes de que se puedan determinar las demás variables de estado.

Ecuación (1), para considerar las reacciones químicas, los balances moleculares y las relaciones adicionales de ecuaciones (**Felder y Rousseau, 2005**).

$$n_{df} = n_{var} - n_{rxt} - n_{mol} - n_{rel} \quad (1)$$

donde:

- n_{df}: grados de libertad de un sistema.
- n_{var}: número de variables.
- n_{rxt}: es el número de reacciones químicas.
- n_{mol}: es el número de balances independientes de especies moleculares.
- n_{rel}: es el número de otras ecuaciones que relacionan las variables desconocidas.

2. Hay siete variables desconocidas (n_{var}) entre las corrientes de entrada y salida de la columna T2, es decir, m_2, $n_1 - n_6$. Como se deben realizar tres balances moleculares independientes (n_{mol}) (para benceno, tolueno y xileno), su número de grados de libertad (n_{df}) se calcula con la Ecuación (1) como 4 (es decir, 7 – 3). En otras palabras, se debería especificar hasta cuatro variables de diseño antes de que las variables de estado puedan ser determinadas.

3. Cuando el límite del sistema se establece para el diagrama de flujo general, se pueden ignorar las variables del producto de fondo de T1, ya que no es una corriente de salida del diagrama general. Por lo tanto, hay cinco variables desconocidas (**n_{var}**), es decir, m_2, $n_4 - n_6$, y se pueden escribir tres balances moleculares independientes (**n_{mol}**). Además, se pueden escribir dos ecuaciones para relacionar las variables desconocidas n_5 y n_6, es decir, $n_{rel} = 2$. Por lo tanto, el número de grados de libertad (**n_{df}**) se calcula como

0 (es decir, 5 – 3 – 2), lo que significa que el balance de masa general del diagrama de flujo se puede resolver sin especificar variables adicionales. En otras palabras, si se especificase alguna variable de diseño, el problema se volvería sobredeterminado.

Resolución:

1. Para la columna T1, los balances moleculares se pueden escribir para benceno, tolueno y xileno, dados en las Ecuaciones 1.1–1.3, respectivamente:

$$35=0.673m1+n_1 \quad (1.1)$$

$$50=0.306m1+n_2 \quad (1.2)$$

$$15=0.021m1+n_3 \quad (1.3)$$

Balances similares se escriben para benceno, tolueno y xileno en la columna T2, dados en las Ecuaciones (1.1–1.3) respectivamente. A continuación, las Ecuaciones (1.13) y (1.14) pueden ser escritas para relacionar las variables n_5 y n_6 con sus caudales de alimentación de componentes hacia la columna T1.

$$n1=0.059m_2+n_4 \quad (1.4)$$

$$n2=0.926m_2+n_5 \quad (1.5)$$

$$n3=0.015m_2+n_6 \quad (1.6)$$

$$n5=0.1(50)=5.0 \quad (1.7)$$

$$n6=0.9(15)=13.5 \quad (1.8)$$

Dado que el problema de balance de masa tiene un total de ocho ecuaciones y ocho variables, el problema puede resolverse convenientemente utilizando la

técnica de inversión de matrices. Las Ecuaciones (1.1)–(1.9) pueden convertirse en su forma matricial:

$$
\begin{pmatrix}
0.673 & 0.0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0.306 & 0.0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0.021 & 0.0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0.0 & 0.059 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0.0 & 0.926 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0.0 & 0.015 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\
0.0 & 0.0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0.0 & 0.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix}
m1 \\ m2 \\ n1 \\ n2 \\ n3 \\ n4 \\ n5 \\ n6
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix}
35 \\ 50 \\ 15 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \\ 13.5
\end{pmatrix}
$$

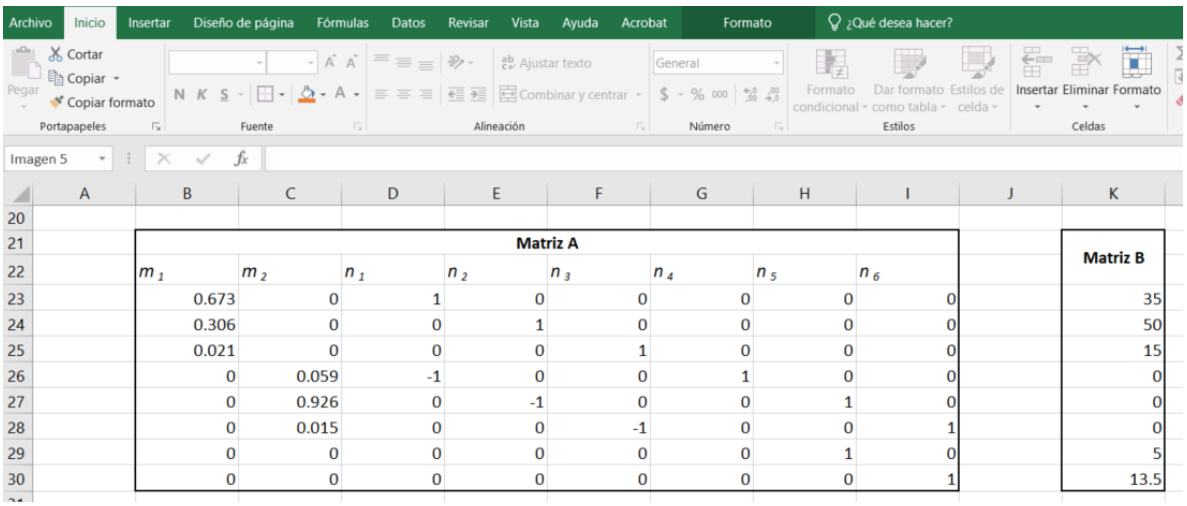
Las variables desconocidas pueden calcularse usando una matriz inversa.

Solución en Excel:

Para la resolución del presente ejercicio en la hoja de cálculo de Excel, se presentarán una secuencia de capturas de pantalla, que comprenden desde la figura 42 hasta la figura 45.

1. Proveer todos los valores para todas las entradas en la matriz A y B.

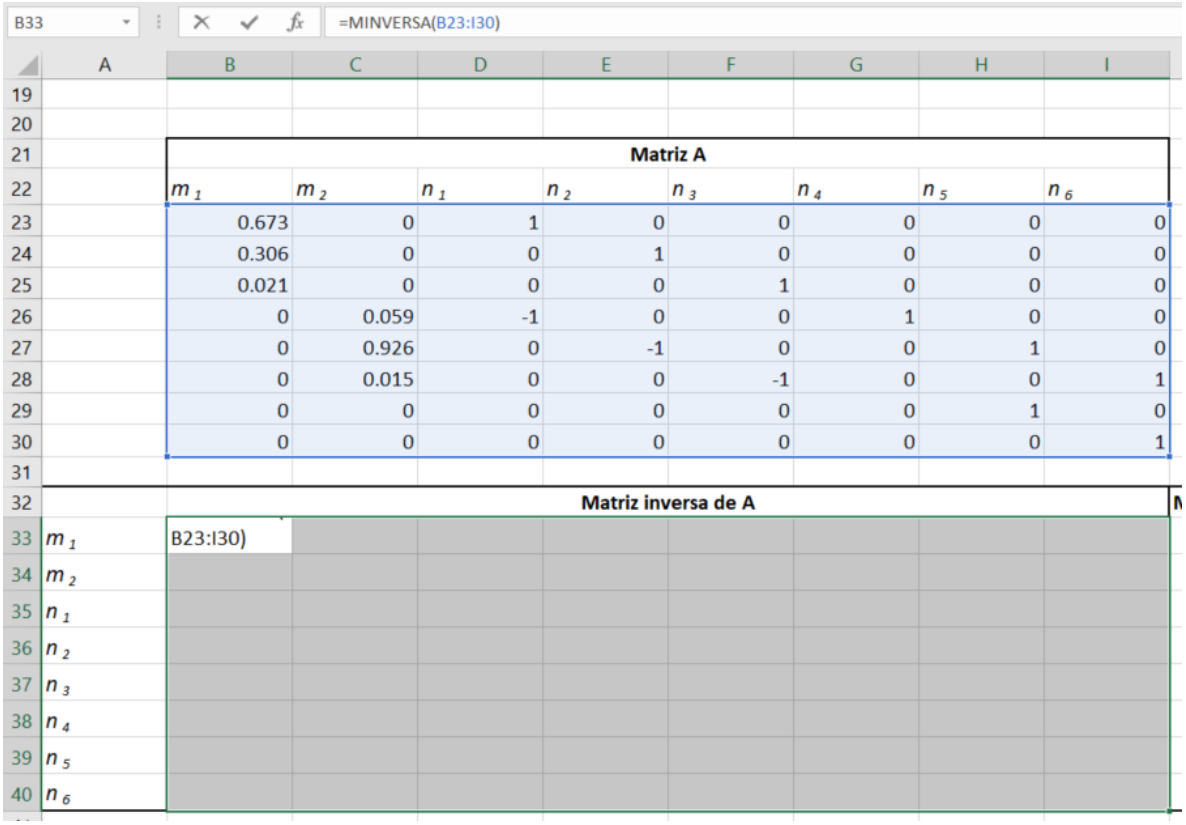
Figura 42. Captura de pantalla de Excel, ingreso de entradas de las matrices A y B



	Matriz A								Matriz B
	m_1	m_2	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	
	0.673	0	1	0	0	0	0	0	35
	0.306	0	0	1	0	0	0	0	50
	0.021	0	0	0	1	0	0	0	15
	0	0.059	-1	0	0	1	0	0	0
	0	0.926	0	-1	0	0	1	0	0
	0	0.015	0	0	-1	0	0	1	0
	0	0	0	0	0	0	1	0	5
	0	0	0	0	0	0	0	1	13.5

2. Para calcular la inversa de la matriz A:
   a) Marque las celdas donde quiera que se calcule la matriz inversa A.
   b) Ingrese el comando =minverse(de la matriz A), marque las celdas donde aparecerán los resultados calculados.
   c) Presione CTRL, SHIFT, ENTER simultáneamente.

Figura 43. Captura de pantalla de Excel, determinación de la inversa de la matriz A



B33 =MINVERSA(B23:I30)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
19									
20									
21		Matriz A							
22		m_1	m_2	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6
23		0.673	0	1	0	0	0	0	0
24		0.306	0	0	1	0	0	0	0
25		0.021	0	0	0	1	0	0	0
26		0	0.059	-1	0	0	1	0	0
27		0	0.926	0	-1	0	0	1	0
28		0	0.015	0	0	-1	0	0	1
29		0	0	0	0	0	0	1	0
30		0	0	0	0	0	0	0	1
31									
32		Matriz inversa de A							
33	m_1	B23:I30)							
34	m_2								
35	n_1								
36	n_2								
37	n_3								
38	n_4								
39	n_5								
40	n_6								

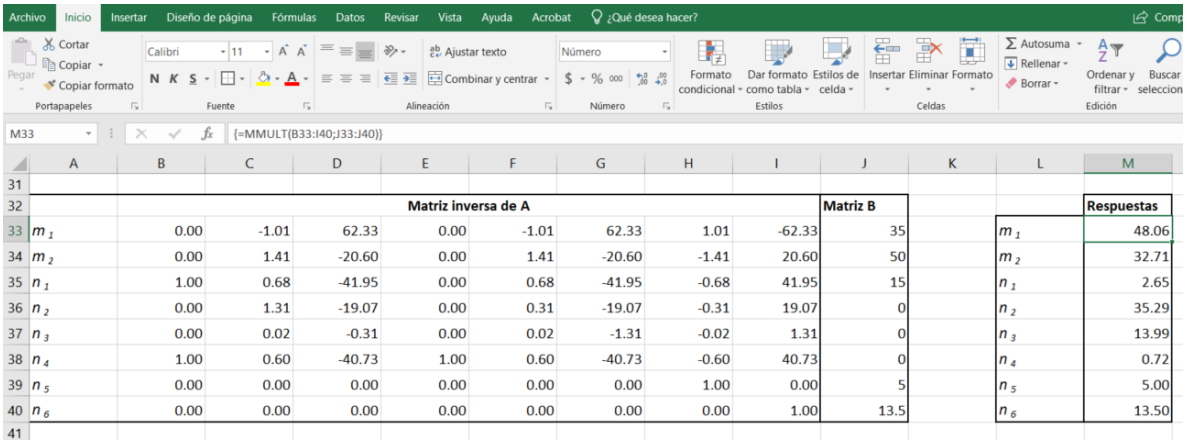
Figura 44. Captura de pantalla de Excel, visualización de la matriz inversa de A

MINVERSA | =MINVERSA(B23:I30)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
19									
20									
21		**Matriz A**							
22		m_1	m_2	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6
23		0.673	0	1	0	0	0	0	0
24		0.306	0	0	1	0	0	0	0
25		0.021	0	0	0	1	0	0	0
26		0	0.059	-1	0	0	1	0	0
27		0	0.926	0	-1	0	0	1	0
28		0	0.015	0	0	-1	0	0	1
29		0	0	0	0	0	0	1	0
30		0	0	0	0	0	0	0	1
31									
32		**Matriz inversa de A**							
33	m_1	=MINVERSA(B23:I30)		62.33	0.00	-1.01	62.33	1.01	-62.33
34	m_2	0.00	1.41	-20.60	0.00	1.41	-20.60	-1.41	20.60
35	n_1	1.00	0.68	-41.95	0.00	0.68	-41.95	-0.68	41.95
36	n_2	0.00	1.31	-19.07	0.00	0.31	-19.07	-0.31	19.07
37	n_3	0.00	0.02	-0.31	0.00	0.02	-1.31	-0.02	1.31
38	n_4	1.00	0.60	-40.73	1.00	0.60	-40.73	-0.60	40.73
39	n_5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
40	n_6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

3. Para calcular la matriz de “respuestas”:
   a. Marque las celdas donde quiera que se calcule la matriz X.
   b. Ingrese el comando =mmult(matriz inversa A;matriz X)
   c. Presione CTRL, SHIFT, ENTER simultáneamente.

Figura 45. Captura de pantalla de Excel, respuestas de la matriz inversa de A



M33 {=MMULT(B33:I40;J33:J40)}

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
31													
32					Matriz inversa de A					Matriz B			Respuestas
33	m_1	0.00	-1.01	62.33	0.00	-1.01	62.33	1.01	-62.33	35		m_1	48.06
34	m_2	0.00	1.41	-20.60	0.00	1.41	-20.60	-1.41	20.60	50		m_2	32.71
35	n_1	1.00	0.68	-41.95	0.00	0.68	-41.95	-0.68	41.95	15		n_1	2.65
36	n_2	0.00	1.31	-19.07	0.00	0.31	-19.07	-0.31	19.07	0		n_2	35.29
37	n_3	0.00	0.02	-0.31	0.00	0.02	-1.31	-0.02	1.31	0		n_3	13.99
38	n_4	1.00	0.60	-40.73	1.00	0.60	-40.73	-0.60	40.73	0		n_4	0.72
39	n_5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	5		n_5	5.00
40	n_6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	13.5		n_6	13.50
41													

Solución en MATLAB:

Para la resolución del presente ejercicio en MATLAB, se presentarán una secuencia de capturas de pantalla, que comprenden desde la figura 46 hasta la figura 48.

Con los datos de las ecuaciones en Excel, en el archivo EjemplosEnExcel, se puede extraer la matriz desde Excel a MATLAB usando los siguientes comandos

```
A= readmatrix("EjemplosEnExcel.xlsx","Sheet","Ejercicio3","Range","C22:J29");
B= readmatrix("EjemplosEnExcel.xlsx","Sheet","Ejercicio3","Range","L22:L29");
```

De los ficheros A y B se ha extraído información del archivo de Microsoft Excel que debe estar agregado a MATLAB. De esta forma el comando readmatrix utilizado en las líneas 3 y 4 del script sirven para extraer desde Microsoft Excel.

El script completo se muestra a continuación:

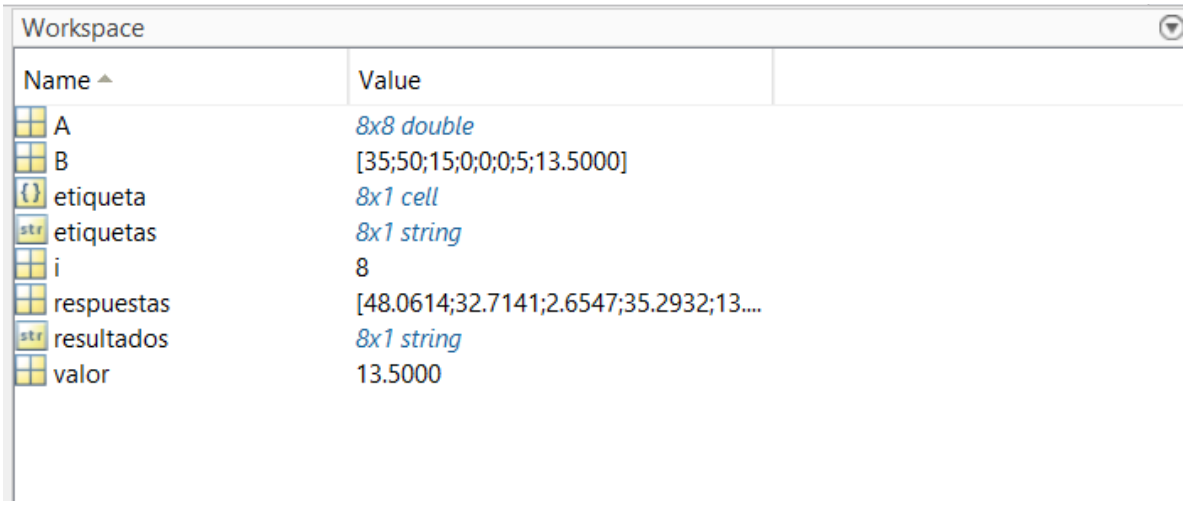
Figura 46. Captura de pantalla de MATLAB, script del ejercicio

Ejercicio3.m

```
% Planteamiento:
% dos columnas de destilación, T1 y T2, que se utilizan para la separación de una corriente de
% proceso que contiene una mezcla de benceno, tolueno y xileno de caudales conocidos.
% El producto de cola de la columna T1 se alimenta a la columna T2. Los caudales del producto
% de cabeza de ambas columnas (m1 y m2) son desconocidos, con composiciones conocidas.
% Además, se indica que el 10.0% del tolueno y el 90.0% del xileno que se alimentan a la columna T1
% se recuperan como productos de fondos de la columna T2. Todas las variables desconocidas,
% es decir, los caudales del producto superior (m1 y m2) y los caudales de los componentes
% del producto de fondos (n1 a n6).
% Determinar las composiciones de las corrientes de vapor y líquido de salida de cada columna.


clear;
clc;

% Leer archivos
A= readmatrix("EjemplosEnExcel.xlsx","Sheet","Ejercicio3","Range","C22:J29");
B= readmatrix("EjemplosEnExcel.xlsx","Sheet","Ejercicio3","Range","L22:L29");
respuestas=A\B;

resultados = string(respuestas);
etiqueta = readcell("EjemplosEnExcel.xlsx","Sheet","Ejercicio3","Range","B32:B39");
etiquetas = string(etiqueta);

% Verificar que tengan el mismo número de líneas
if length(etiquetas) ~= length(resultados)
    error('Los archivos no tienen el mismo número de líneas');
end

for i = 1:length(resultados)
    valor = str2double(resultados(i)); % Convertir a número para dar formato decimal
    fprintf('%s = %.2f\n', etiquetas(i), valor);
end
```

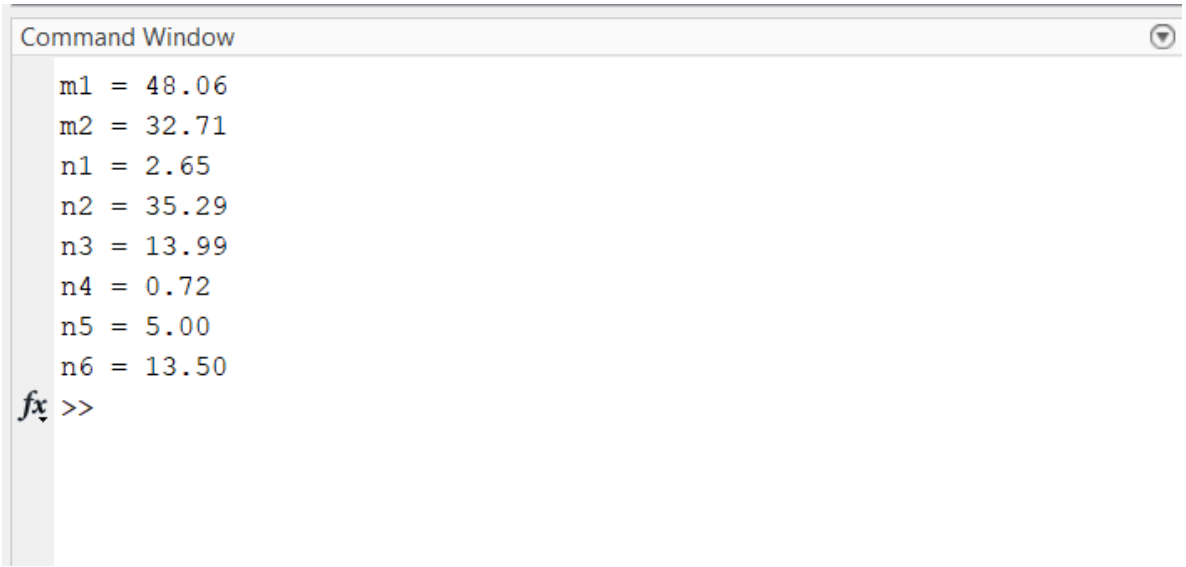
Dando clic en ejecutar se crearán los ficheros en workspace de MATLAB

Figura 47. Captura de pantalla de MATLAB, creación de los ficheros en workspace



Para visualizar las soluciones, en Command Window:

Figura 48. Captura de pantalla de MATLAB, respuestas en Command Window



Ejercicio 9:

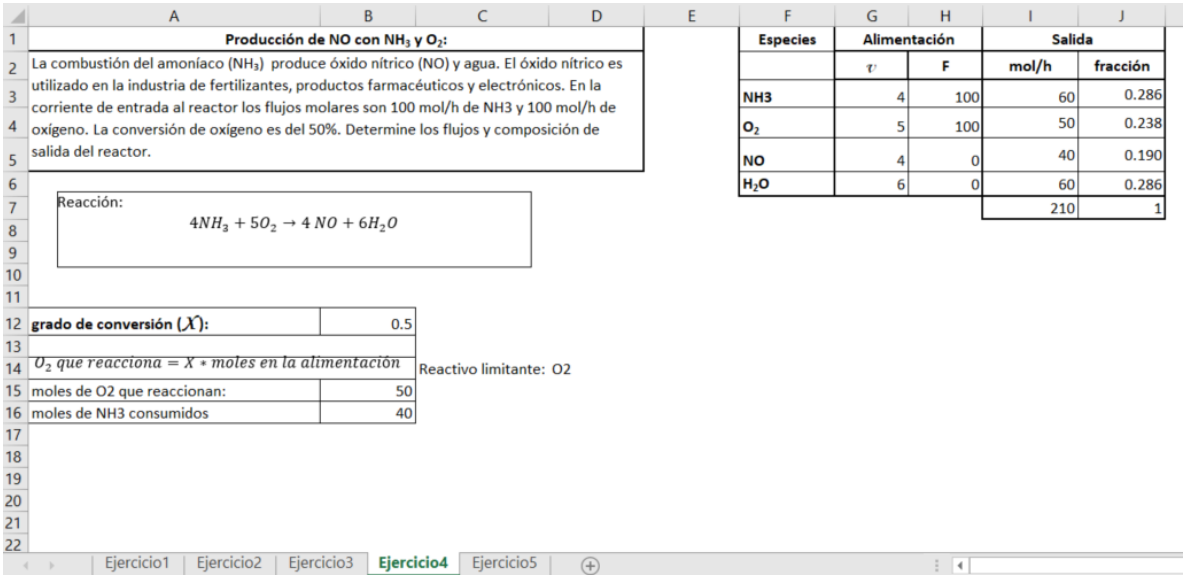
La combustión del amoníaco (NH_3) produce mediante la reacción entre óxido nítrico (NO) y agua. El óxido nítrico es utilizado en la industria de fertilizantes, productos farmacéuticos y electrónicos. La reacción es la siguiente. En la corriente de entrada al reactor los flujos molares son 7 mol/h de NH3 y 7 mol/h de oxígeno. Determine los flujos y composición de salida del reactor.

$$4\ NH_3 + 5\ O_2 \rightarrow 4\ NO + 6\ H_2O$$

Solución en Excel:

Para la resolución del presente ejercicio en la hoja de cálculo de Excel, se presentarán una secuencia de capturas de pantalla, que comprenden desde la figura 49 hasta la figura 57.

Figura 49. Captura de pantalla de Excel, ingreso de información del ejercicio



Producción de NO con NH_3 y O_2:

La combustión del amoníaco (NH_3) produce óxido nítrico (NO) y agua. El óxido nítrico es utilizado en la industria de fertilizantes, productos farmacéuticos y electrónicos. En la corriente de entrada al reactor los flujos molares son 100 mol/h de NH3 y 100 mol/h de oxígeno. La conversión de oxígeno es del 50%. Determine los flujos y composición de salida del reactor.

Reacción:

$$4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4\ NO + 6H_2O$$

Especies	Alimentación		Salida	
	τ	F	mol/h	fracción
NH3	4	100	60	0.286
O_2	5	100	50	0.238
NO	4	0	40	0.190
H_2O	6	0	60	0.286
			210	1

grado de conversión (X):	0.5
$O_2\ que\ reacciona = X * moles\ en\ la\ alimentación$	
moles de O2 que reaccionan:	50
moles de NH3 consumidos	40

Reactivo limitante: O2

Ejercicio1 | Ejercicio2 | Ejercicio3 | Ejercicio4 | Ejercicio5

Introducir los datos acordes a la reacción:

Figura 50. Captura de pantalla de Excel, ingreso de los datos

F	G	H
Especies	**Alimentación**	
	τ	**F**
NH3	4	100
O_2	5	100
NO	4	0
H_2O	6	0

Calcular las moles de oxígeno que reacciona según el grado de conversión especificado:

Figura 51. Captura de pantalla de Excel, determinación de las moles de oxígeno

MINVERSA | =+B12*H4

Producción de NO con NH_3 y O_2:

La combustión del amoníaco (NH_3) produce óxido nítrico (NO) y agua. El óxido nítrico es utilizado en la industria de fertilizantes, productos farmacéuticos y electrónicos. En la corriente de entrada al reactor los flujos molares son 100 mol/h de NH3 y 100 mol/h de oxígeno. La conversión de oxígeno es del 50%. Determine los flujos y composición de salida del reactor.

Reacción:

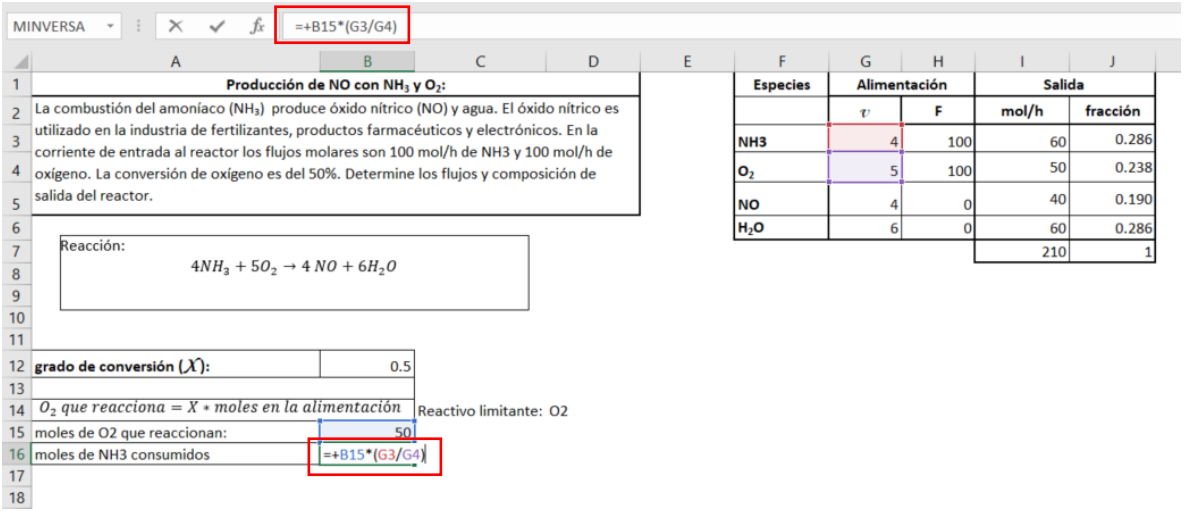
$$4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4\,NO + 6H_2O$$

grado de conversión (X):	0.5
$O_2\ que\ reacciona = X * moles\ en\ la\ alimentación$	Reactivo limitante: O2
moles de O2 que reaccionan:	=+B12*H4
moles de NH3 consumidos	40

Especies	Alimentación		Salida	
	τ	F	mol/h	fracción
NH3	4	100	60	0.286
O_2	5	100	50	0.238
NO	4	0	40	0.190
H_2O	6	0	60	0.286
			210	1

Calcular los moles de NH3 consumidos:

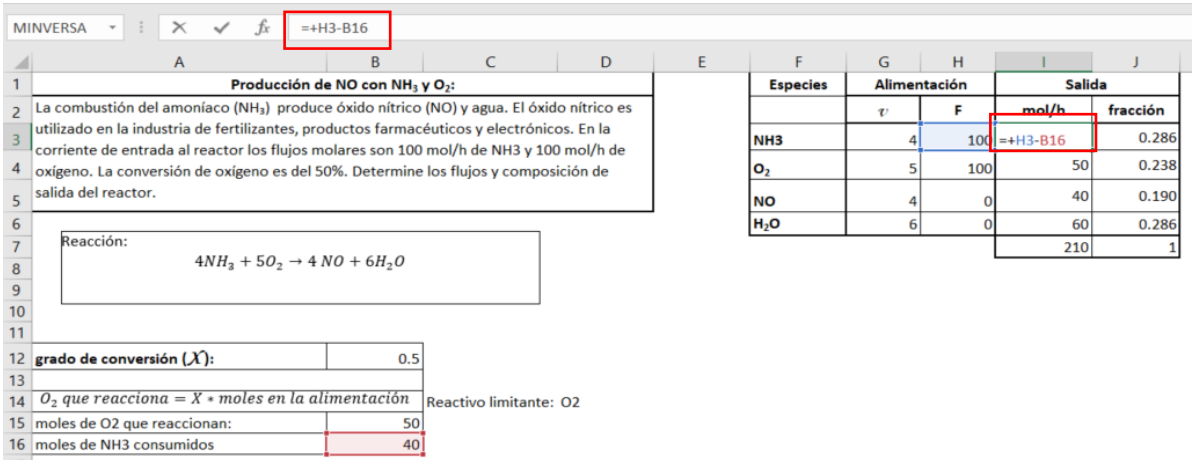
Figura 52. Captura de pantalla de Excel, determinación de las moles de NH3 consumidos



Calcular los moles de gases en la salida.

Figura 53. Captura de pantalla de Excel, cálculo de las moles de NH3 a la salida

Moles de NH3 en la salida:



Calcular el número de moles de O2 en la salida:

Figura 54. Captura de pantalla de Excel, cálculo de las moles de O2 a la salida

MINVERSA | =+H4-B15

Producción de NO con NH_3 y O_2:

La combustión del amoníaco (NH_3) produce óxido nítrico (NO) y agua. El óxido nítrico es utilizado en la industria de fertilizantes, productos farmacéuticos y electrónicos. En la corriente de entrada al reactor los flujos molares son 100 mol/h de NH3 y 100 mol/h de oxígeno. La conversión de oxígeno es del 50%. Determine los flujos y composición de salida del reactor.

Reacción:

$$4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4\,NO + 6H_2O$$

Especies	Alimentación		Salida	
	υ	F	mol/h	fracción
NH3	4	100	60	0.286
O_2	5	100	=+H4-B15	0.238
NO	4	0	40	0.190
H_2O	6	0	60	0.286
			210	1

grado de conversión ($\mathcal{X}$):	0.5
$O_2\ que\ reacciona = X * moles\ en\ la\ alimentación$	
moles de O2 que reaccionan:	50
moles de NH3 consumidos	40

Reactivo limitante: O2

Calcular el número de moles de NO producido:

Figura 55. Captura de pantalla de Excel, cálculo de las moles de NO producido

I5 | =+B15*(G5/G4)

Producción de NO con NH_3 y O_2:

La combustión del amoníaco (NH_3) produce óxido nítrico (NO) y agua. El óxido nítrico es utilizado en la industria de fertilizantes, productos farmacéuticos y electrónicos. En la corriente de entrada al reactor los flujos molares son 100 mol/h de NH3 y 100 mol/h de oxígeno. La conversión de oxígeno es del 50%. Determine los flujos y composición de salida del reactor.

Reacción:

$$4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4\,NO + 6H_2O$$

Especies	Alimentación		Salida	
	υ	F	mol/h	fracción
NH3	4	100	60	0.286
O_2	5	100	50	0.238
NO	4	0	40	0.190
H_2O	6	0	60	0.286
			210	1

grado de conversión ($\mathcal{X}$):	0.5
$O_2\ que\ reacciona = X * moles\ en\ la\ alimentación$	
moles de O2 que reaccionan:	50
moles de NH3 consumidos	40

Reactivo limitante: O2

Calcular el número de moles de agua en la salida:

Figura 56. Captura de pantalla de Excel, cálculo de las moles de agua a la salida

I6 =+B15*(G6/G4)

Producción de NO con NH_3 y O_2:

La combustión del amoníaco (NH_3) produce óxido nítrico (NO) y agua. El óxido nítrico es utilizado en la industria de fertilizantes, productos farmacéuticos y electrónicos. En la corriente de entrada al reactor los flujos molares son 100 mol/h de NH3 y 100 mol/h de oxígeno. La conversión de oxígeno es del 50%. Determine los flujos y composición de salida del reactor.

Reacción:

$$4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4\,NO + 6H_2O$$

Especies	Alimentación		Salida	
	ν	F	mol/h	fracción
NH3	4	100	60	0.286
O_2	5	100	50	0.238
NO	4	0	40	0.190
H_2O	6	0	60	0.286
			210	1

grado de conversión (X):	0.5
O_2 *que reacciona* $= X *$ *moles en la alimentación*	Reactivo limitante: O2
moles de O2 que reaccionan:	50
moles de NH3 consumidos	40

Por otra parte, las fracciones molares se calculan en la siguiente columna, dividiendo el número de moles calculadas en la columna I3 a I5.

Figura 57a. Captura de pantalla de Excel, cálculo de las fracciones molares

MINVERSA =+I3/$I$7

Producción de NO con NH_3 y O_2:

La combustión del amoníaco (NH_3) produce óxido nítrico (NO) y agua. El óxido nítrico es utilizado en la industria de fertilizantes, productos farmacéuticos y electrónicos. En la corriente de entrada al reactor los flujos molares son 100 mol/h de NH3 y 100 mol/h de oxígeno. La conversión de oxígeno es del 50%. Determine los flujos y composición de salida del reactor.

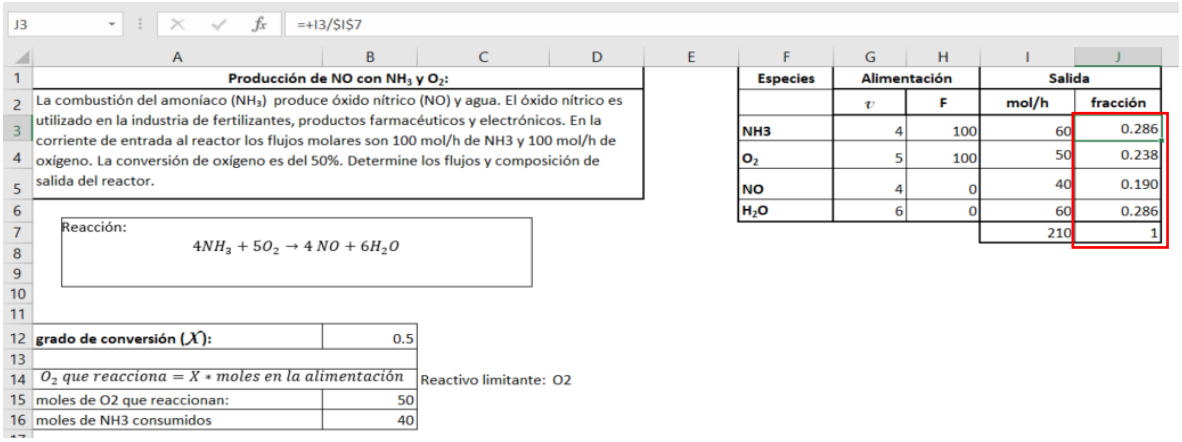
Reacción:

$$4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4\,NO + 6H_2O$$

Especies	Alimentación		Salida	
	ν	F	mol/h	fracción
NH3	4	100	60	=+I3/$I$7
O_2	5	100	50	0.238
NO	4	0	40	0.190
H_2O	6	0	60	0.286
			210	1

grado de conversión (X):	0.5
O_2 *que reacciona* $= X *$ *moles en la alimentación*	Reactivo limitante: O2
moles de O2 que reaccionan:	50
moles de NH3 consumidos	40

Figura 57b. Captura de pantalla de Excel, cálculo de las fracciones molares



J3 =+I3/$I$7

Producción de NO con NH_3 y O_2:

La combustión del amoníaco (NH_3) produce óxido nítrico (NO) y agua. El óxido nítrico es utilizado en la industria de fertilizantes, productos farmacéuticos y electrónicos. En la corriente de entrada al reactor los flujos molares son 100 mol/h de NH3 y 100 mol/h de oxígeno. La conversión de oxígeno es del 50%. Determine los flujos y composición de salida del reactor.

Especies	Alimentación		Salida	
	τ	F	mol/h	fracción
NH3	4	100	60	0.286
O_2	5	100	50	0.238
NO	4	0	40	0.190
H_2O	6	0	60	0.286
			210	1

Reacción:

$$4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4\,NO + 6H_2O$$

grado de conversión ($\mathcal{X}$):	0.5
$O_2\ que\ reacciona = X * moles\ en\ la\ alimentación$	
moles de O2 que reaccionan:	50
moles de NH3 consumidos	40

Reactivo limitante: O2

Resolución en MATLAB.

Para la resolución del presente ejercicio en MATLAB, se presentarán una secuencia de capturas de pantalla, que comprenden desde la figura 58 hasta la figura 60.

Se plantea el siguiente script:

Figura 58a. Captura de pantalla de MATLAB, script del ejercicio

Editor - C:\Users\Byron Lapo\OneDrive - utmachala.edu.ec (1)\ProduccionCientifica\Artículos en pro...

Ejercicio3.m | Ejercicio2.m | Ejercicio4.m | Ejercicio5.m

```
% Planteamiento
% La combustión del amoníaco (NH₃)  produce óxido nítrico (NO) y agua.
% El óxido nítrico es utilizado en la industria de fertilizantes,
% productos farmacéuticos y electrónicos.
% En la corriente de entrada al reactor los flujos molares son 100 mol/h
% y 100 mol/h de oxígeno. La conversión de oxígeno es del 50%.
% Determine los flujos y composición de salida del reactor.

% Reacciòn: 4NH3 + 5O2 -> 4NO + 6H2O

clear
clc

% Ingreso de datos:
alimentacion_NH3 = 100;
alimentacion_O2 = 100;
n_NH3 = 4;
n_O2 = 5;
n_NO = 4;
n_H2O = 6;
X = 0.5; % grado de conversiòn.
O2_reacciona = alimentacion_O2*X;
NH3_consumidos = O2_reacciona*(n_NH3/n_O2);

% gas en la salida
% calculo en moles:

salida_NH3 = alimentacion_NH3- NH3_consumidos;
salida_O2 = alimentacion_O2- O2_reacciona;
salida_NO = O2_reacciona*(n_NO/n_O2);
salida_H2O = O2_reacciona*(n_H2O/n_O2);
```

Figura 58b. Captura de pantalla de MATLAB, continuación del script del ejercicio

Ejercicio3.m | Ejercicio2.m | Ejercicio4.m | Ejercicio5.m

```
27
28  salida_NH3 = alimentacion_NH3- NH3_consumidos;
29  salida_O2 = alimentacion_O2- O2_reacciona;
30  salida_NO = O2_reacciona*(n_NO/n_O2);
31  salida_H2O = O2_reacciona*(n_H2O/n_O2);
32  moles_total = salida_NH3 + salida_O2 + salida_NO + salida_H2O;
33
34  % calculo en fracción:
35  y_NH3 = salida_NH3/moles_total;
36  y_O2 = salida_O2/moles_total;
37  y_NO = salida_NO/moles_total;
38  y_H2O = salida_H2O/moles_total;
39
40  % Mostrar resultados
41  fprintf('\n--- Resultados del Balance de Masa ---\n');
42  fprintf('NH3 salida     = %.2f mol\n', salida_NH3);
43  fprintf('O2 salida       = %.2f mol\n', salida_O2);
44  fprintf('NO salida       = %.2f mol\n', salida_NO);
45  fprintf('H2O salida      = %.2f mol\n', salida_H2O);
46  fprintf('Flujo total     = %.2f mol\n', moles_total);
47
48  fprintf('\n--- Composición Molar de la Corriente de Salida ---\n');
49  fprintf('y_C2H6  = %.3f\n', y_NH3);
50  fprintf('y_O2    = %.3f\n', y_O2);
51  fprintf('y_NO   = %.3f\n', y_NO);
52  fprintf('y_H2O   = %.3f\n', y_H2O);
53
```

Vista del workspace:

Figura 59. Captura de pantalla de MATLAB, vista del workspace del ejercicio

Workspace

Name	Value
alimentacion_NH3	100
alimentacion_O2	100
moles_total	210
n_H2O	6
n_NH3	4
n_NO	4
n_O2	5
NH3_consumidos	40
O2_reacciona	50
salida_H2O	60
salida_NH3	60
salida_NO	40
salida_O2	50
X	0.5000
y_H2O	0.2857
y_NH3	0.2857
y_NO	0.1905
y_O2	0.2381

Vista de los resultados en Command Window:

Figura 60. Captura de pantalla de MATLAB, resultados del ejercicio

```
Command Window

--- Resultados del Balance de Masa ---
NH3 salida      = 60.00 mol
O2 salida        = 50.00 mol
NO salida        = 40.00 mol
H2O salida       = 60.00 mol
Flujo total      = 210.00 mol

--- Composición Molar de la Corriente de Salida ---
y_C2H6  = 0.286
y_O2    = 0.238
y_NO   = 0.190
y_H2O   = 0.286
fx >>
```

EJERCICIO 10:

En un reactor en estado estacionario se lleva a cabo la combustión completa de etano. Se alimentan 80 moles de etano con 20 moles de oxígeno molecular en la corriente 1, y en la corriente 2 se inyecta oxígeno con un 200% en exceso, en las cuales ocurre un 80% de conversión del etano que se alimenta al reactor y del etano que reacciona el 25% forma monóxido de carbono, con el objetivo de formar principalmente dióxido de carbono, ¿Cuáles serían los flujos molares a la salida del sistema, su composición molar, el rendimiento y la selectividad del dióxido de carbono para la producción de monóxido de carbono?

Reacción 1:

$$C_2H_6 + \frac{7}{2}O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$$

Reacción 2:

$$C_2H_6 + \frac{5}{2}O_2 \rightarrow 2CO + 3H_2O$$

Resolución en Microsoft Excel.

Para la resolución del presente ejercicio en la hoja de cálculo de Excel, se presentarán una secuencia de capturas de pantalla, que comprenden desde la figura 61 hasta la figura 71.

En la hoja de Excel EjemplosEnExcel se puede encontrar en la hoja de cálculo "Ejercicio10" la resolución del presente ejercicio.

1. Calcular el exceso de O2:

$$Fracción\ exceso\ O_2 = \frac{n_{O_2\ alimentado\ F} + n_{O_2\ alimentado\ B} - n_{C_2H_6 F\ alimentado} * \frac{v_{O_2} O_2}{v_{C_2H_6} C_2H_6}}{n_{C_2H_6 F\ alimentado} * \frac{v_{O_2} O_2}{v_{C_2H_6} C_2H_6}}$$

Figura 61. Captura de pantalla de Excel, ingreso de información del ejercicio

21	**Cálculo:**	
22	***n O2_alimentado en flujo B***	**840**
23	*n O2_alimentado F*	20
24	*n C2H6_alimentado F*	80
25	*v O2*	3.5
26	*v C2H6*	1
27	*n O2_exceso*	2

B22 =(B24*B27*(B25/B26))+B24*((B25/B26))

	A	B	C
22	***n O2_alimentado en flujo B***	**840**	
23	*n O2_alimentado F*	20	
24	*n C2H6_alimentado F*	80	
25	*v O2*	3.5	
26	*v C2H6*	1	
27	*n O2_exceso*	2	

2. Calcular las composiciones del gas de salida:

Las ecuaciones, las fórmulas corresponden al ejercicio 4, del apartado 3.4 de este libro.

Balance de materia para las especies químicas en el reactor:

$$n_{Gas\ de\ salida} = n_{i0} * \left[\frac{n_{A0}}{n_{i0}} + \sum_j \left(\frac{v_{aj} * (X_i)(f_j)}{\pm v_{ij}}\right)\right]$$

$$n_{Gas\ de\ salida} = n_{i0} * \left[\frac{n_{A0F} + n_{A0B}}{n_{i0}} + \sum_j \left(\frac{v_{aj} * (X_i)(f_j)}{\pm v_{ij}}\right)\right]$$

Especie	Salida = Gas de salida
C_2H_6	$80\ mol\ C_2H_6 * \left[\frac{80\ mol\ C_2H_6}{80\ mol\ C_2H_6} + \frac{1 * (0.8)(0.75)}{-1} + \frac{1 * (0.8)(0.25)}{-1}\right]$
O_2	$80\ mol\ C_2H_6 * \left[\frac{20\ mol\ O_2 + n_{O_2B}}{80\ mol\ C_2H_6} + \frac{\frac{7}{2} * (0.8)(0.75)}{-1} + \frac{\frac{5}{2} * (0.8)(0.25)}{-1}\right]$
CO_2	$80\ mol\ C_2H_6 * \left[\frac{0\ CO_2}{80\ mol\ C_2H_6} + \frac{2 * (0.8)(0.75)}{+1}\right]$
H_2O	$80\ mol\ C_2H_6 * \left[\frac{0\ mol\ H_2O}{80\ mol\ C_2H_6} + \frac{3 * (0.8)(0.75)}{+1} + \frac{3 * (0.8)(0.25)}{+1}\right]$
CO	$80\ mol\ C_2H_6 * \left[\frac{0\ CO}{80\ mol\ C_2H_6} + \frac{2 * (0.8)(0.25)}{+1}\right]$

Se ingresan los datos acordes a las ecuaciones.

v: representa los coeficientes estequiométricos acorde a las reacciones 1 y 2. Se debe tomar en cuenta los signos.

n: representa el número de moles acorde al planteamiento del ejercicio.

Esto para todas las especies en la reacción 1, 2 y el gas de salida. Se debe tomar además en cuenta el rendimiento y selectividad de las reacciones.

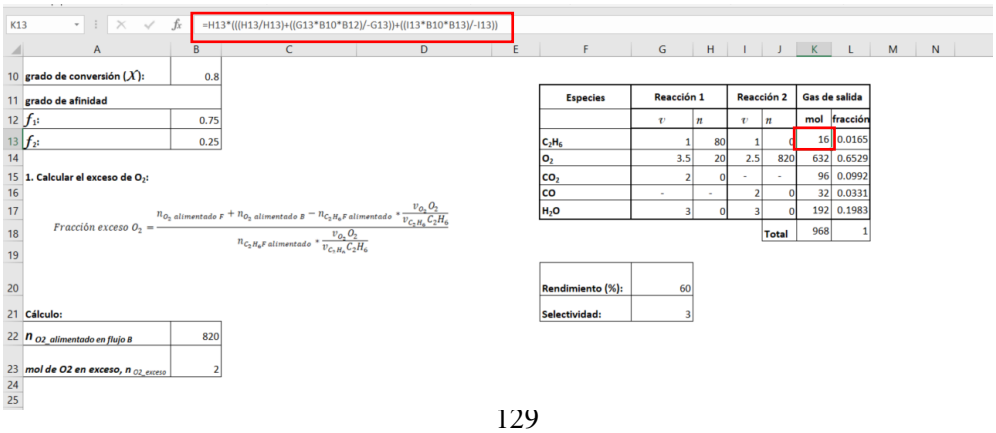
Figura 62. Captura de pantalla de Excel, ingreso de los coeficientes estequiométricos y numero de moles del ejercicio.

F	G	H	I	J	K	L
Especies	**Reacción 1**		**Reacción 2**		**Gas de salida**	
	v	n	v	n	**mol**	**fracción**
C_2H_6	1	80	1	0	16	0.016
O_2	3.5	20	2.5	840	652	0.66
CO_2	2	0	-	-	96	0.097
CO	-	-	2	0	32	0.032
H_2O	3	0	3	0	192	0.194
				Total	988	1

Rendimiento (%):	60
Selectividad:	3

Cálculo de moles de C_2H_6 en el gas de salida:

Figura 63. Captura de pantalla de Excel, moles de C_2H_6 en el gas de salida



Cálculo de la fracción molar de C_2H_6 en el gas de salida:

Figura 64. Captura de pantalla de Excel, fracción molar de C_2H_6 en el gas de salida

L13 =K13/$K$18

	A	B
10	grado de conversión (X):	0.8
11	grado de afinidad	
12	f_1:	0.75
13	f_2:	0.25
14		
15	1. Calcular el exceso de O_2:	
16		
17		
18		
19		
20		
21	Cálculo:	
22	$n_{O2_alimentado\ en\ flujo\ B}$	820
23	mol de O2 en exceso, n_{O2_exceso}	2
24		
25		

$$Fracción\ exceso\ O_2 = \frac{n_{O_2\ alimentado\ F} + n_{O_2\ alimentado\ B} - n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}{n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}$$

Especies	Reacción 1		Reacción 2		Gas de salida	
	v	n	v	n	mol	fracción
C_2H_6	1	80	1	0	16	0.0165
O_2	3.5	20	2.5	820	632	0.6529
CO_2	2	0	-	-	96	0.0992
CO	-	-	2	0	32	0.0331
H_2O	3	0	3	0	192	0.1983
				Total	968	1

Rendimiento (%):	60
Selectividad:	3

Calcular la concentración molar de O_2 en el gas de salida:

Figura 65. Captura de pantalla de Excel, concentración molar de O_2 en el gas de salida

K14 =+H13*(((H14+J14)/H13)+((G14*B10*B12)/-G13)+((I14*B10*B13)/-I13))

	A	B
10	grado de conversión (X):	0.8
11	grado de afinidad	
12	f_1:	0.75
13	f_2:	0.25
14		
15	1. Calcular el exceso de O_2:	
16		
17		
18		
19		
20		
21	Cálculo:	
22	$n_{O2_alimentado\ en\ flujo\ B}$	820
23	mol de O2 en exceso, n_{O2_exceso}	2
24		
25		

$$Fracción\ exceso\ O_2 = \frac{n_{O_2\ alimentado\ F} + n_{O_2\ alimentado\ B} - n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}{n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}$$

Especies	Reacción 1		Reacción 2		Gas de salida	
	v	n	v	n	mol	fracción
C_2H_6	1	80	1	0	16	0.0165
O_2	3.5	20	2.5	820	632	0.6529
CO_2	2	0	-	-	96	0.0992
CO	-	-	2	0	32	0.0331
H_2O	3	0	3	0	192	0.1983
				Total	968	1

Rendimiento (%):	60
Selectividad:	3

Calcular la concentración molar de CO_2 en el gas de salida:

Figura 66. Captura de pantalla de Excel, concentración molar de CO_2 en el gas de salida

K15 =H13*((H15/H13)+((G15*B10*B12)/1))

	A	B
10	grado de conversión (X):	0.8
11	grado de afinidad	
12	f_1:	0.75
13	f_2:	0.25
14		
15	1. Calcular el exceso de O_2:	
16		
17–18	$Fracción\ exceso\ O_2 = \frac{n_{O_2\ alimentado\ F} + n_{O_2\ alimentado\ B} - n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}{n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}$	
19		
20		
21	Cálculo:	

Especies	Reacción 1		Reacción 2		Gas de salida	
	v	n	v	n	mol	fracción
C_2H_6	1	80	1	0	16	0.016
O_2	3.5	20	2.5	840	652	0.66
CO_2	2	0	-	-	96	0.097
CO	-	-	2	0	32	0.032
H_2O	3	0	3	0	192	0.194
				Total	988	1

Rendimiento (%):	60
Selectividad:	3

Calcular la fracción molar de CO_2 en el gas de salida:

Figura 67. Captura de pantalla de Excel, fracción molar de CO_2 en el gas de salida

L15 =K15/$K$18

	A	B
10	grado de conversión (X):	0.8
11	grado de afinidad	
12	f_1:	0.75
13	f_2:	0.25
14		
15	1. Calcular el exceso de O_2:	
16		
17–18	$Fracción\ exceso\ O_2 = \frac{n_{O_2\ alimentado\ F} + n_{O_2\ alimentado\ B} - n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}{n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}$	
19		
20		
21	Cálculo:	

Especies	Reacción 1		Reacción 2		Gas de salida	
	v	n	v	n	mol	fracción
C_2H_6	1	80	1	0	16	0.016
O_2	3.5	20	2.5	840	652	0.66
CO_2	2	0	-	-	96	0.097
CO	-	-	2	0	32	0.032
H_2O	3	0	3	0	192	0.194
				Total	988	1

Rendimiento (%):	60
Selectividad:	3

Calcular la concentración molar de CO en el gas de salida:

Figura 68. Captura de pantalla de Excel, concentración molar de CO en el gas de salida

K16 =H13*((J16/H13)+((I16*B10*B13)/1))

	A	B
10	grado de conversión (X):	0.8
11	grado de afinidad	
12	f_1:	0.75
13	f_2:	0.25
14		
15	1. Calcular el exceso de O_2:	
16		
17	$Fracción\ exceso\ O_2 = \frac{n_{O_2\ alimentado\ F} + n_{O_2\ alimentado\ B} - n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}{n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}$	
18		
19		
20		
21	Cálculo:	

Especies	Reacción 1		Reacción 2		Gas de salida	
	v	n	v	n	mol	fracción
C_2H_6	1	80	1	0	16	0.016
O_2	3.5	20	2.5	840	652	0.66
CO_2	2	0	-	-	96	0.097
CO	-	-	2	0	32	0.032
H_2O	3	0	3	0	192	0.194
				Total	988	1

Rendimiento (%):	60
Selectividad:	3

Calcular la fracción molar de CO en el gas de salida:

Figura 69. Captura de pantalla de Excel, fracción molar de CO en el gas de

L16 =K16/SK$18

	A	B
10	grado de conversión (X):	0.8
11	grado de afinidad	
12	f_1:	0.75
13	f_2:	0.25
14		
15	1. Calcular el exceso de O_2:	
16		
17	$Fracción\ exceso\ O_2 = \frac{n_{O_2\ alimentado\ F} + n_{O_2\ alimentado\ B} - n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}{n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}$	
18		
19		
20		
21	Cálculo:	

Especies	Reacción 1		Reacción 2		Gas de salida	
	v	n	v	n	mol	fracción
C_2H_6	1	80	1	0	16	0.016
O_2	3.5	20	2.5	840	652	0.66
CO_2	2	0	-	-	96	0.097
CO	-	-	2	0	32	0.032
H_2O	3	0	3	0	192	0.194
				Total	988	1

Rendimiento (%):	60
Selectividad:	3

Calcular la concentración molar de H_2O en el gas de salida:

Figura 70. Captura de pantalla de Excel, concentración molar de H_2O en el gas de salida

K17 =+H13*((H17/H13)+((G17*B10*B12)/1)+((G17*B10*B13)/1))

	A	B
10	grado de conversión (X):	0.8
11	grado de afinidad	
12	f_1:	0.75
13	f_2:	0.25
14		
15	1. Calcular el exceso de O_2:	
16		
17		
18		
19		
20		
21	Cálculo:	

$$Fracción\ exceso\ O_2 = \frac{n_{O_2\ alimentado\ F} + n_{O_2\ alimentado\ B} - n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}{n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}$$

Especies	Reacción 1		Reacción 2		Gas de salida	
	v	n	v	n	mol	fracción
C_2H_6	1	80	1	0	16	0.016
O_2	3.5	20	2.5	840	652	0.66
CO_2	2	0	-	-	96	0.097
CO	-	-	2	0	32	0.032
H_2O	3	0	3	0	192	0.194
				Total	988	1

Rendimiento (%):	60
Selectividad:	3

Calcular la fracción molar de H_2O en el gas de salida:

Figura 71. Captura de pantalla de Excel, fracción molar de H_2O en el gas de

L17 =K17/$K$18

	A	B
10	grado de conversión (X):	0.8
11	grado de afinidad	
12	f_1:	0.75
13	f_2:	0.25
14		
15	1. Calcular el exceso de O_2:	
16		
17		
18		
19		
20		
21	Cálculo:	

$$Fracción\ exceso\ O_2 = \frac{n_{O_2\ alimentado\ F} + n_{O_2\ alimentado\ B} - n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}{n_{C_2H_6F\ alimentado} * \frac{v_{O_2}O_2}{v_{C_2H_6}C_2H_6}}$$

Especies	Reacción 1		Reacción 2		Gas de salida	
	v	n	v	n	mol	fracción
C_2H_6	1	80	1	0	16	0.016
O_2	3.5	20	2.5	840	652	0.66
CO_2	2	0	-	-	96	0.097
CO	-	-	2	0	32	0.032
H_2O	3	0	3	0	192	0.194
				Total	988	1

Rendimiento (%):	60
Selectividad:	3

Resolución en MATLAB

Para la resolución del ejercicio 10 en MATLAB, se presentarán una secuencia de capturas de pantalla, que comprenden desde la figura 72 hasta la figura 74.

Figura 72a. Captura de pantalla de MATLAB, Script para el Ejercicio 10.

Ejercicio5.m

```
clc;
clear;
% Planteamiento:
% En un reactor en estado estacionario se lleva a cabo la combustión completa de etano.
% Se alimentan 80 moles de etano con 20 moles de oxígeno molecular en la corriente 1,
% y en la corriente 2 se inyecta oxígeno con un 200% en exceso,
% en las cuales ocurre un 80% de conversión del etano que se alimenta al reactor,
% y del etano que reacciona el 25% forma monóxido de carbono, con el objetivo de formar
% principalmente dióxido de carbono, ¿Cuáles serían los flujos molares a la salida del
% sistema, su composición molar, el rendimiento y la selectividad del Dióxido de carbono
% para la producción de Monóxido de carbono?

% Reacciones
% R1: C2H6 + 3.5O2 -> 2CO2 + 3H20
% R2: C2H6 + 2.5O2 -> 2CO + 3H2O

% Entradas:
% Corriente 1 - F1
n_C2H6_F1 = 80;          % alimentación de etano en F1 (mol)
n_O2_F1 = 20;            % alimentación de O2 en R1 (mol)

% Reacción1 - R1
v_C2H6_R1 = 1;           % coeficiente estequiométrico de C2H6 en R1
v_O2_R1 = 3.5;           % coeficiente estequiométrico de O2 en R1

% Reacción 2 - R2
v_C2H6_R2 = 1;           % coeficiente estequiométrico de C2H6 en R2
n_C2H6_R2 = 0;           % alimentación de etano en R2 (mol)
v_O2_R2 = 2.5;            % coeficiente estequiométrico de O2 en R2

% Cálculo de O2 en exceso en Corriente 2 - F2:
```

Figura 72b. Captura de pantalla de MATLAB, Script para el Ejercicio 10.

Ejercicio5.m

```
30
31  % Cálculo de O2 en exceso en Corriente 2 - F2:
32  % O2 total con 200% en exceso
33
34  O2_exceso_F2 = (2*n_C2H6_F1*(v_O2_R1/v_C2H6_R1))-n_O2_F1+(n_C2H6_F1*(v_O2_R1/v_C2H6_R1));
35
36  n_O2_R2 = O2_exceso_F2;      % alimentación de O2 en R2 (mol)
37
38
39  % Conversión y distribución de productos
40  X = 0.80;                   % Grado de Conversión de C2H6
41  frac_CO2 = 0.75;            % Grado de afinidad que forma CO2
42  frac_CO = 0.25;             % Fracción de C2H6 que forma CO
43
44  % Cálculo de C2H6 que reacciona y que no reacciona
45  C2H6_reacciona = n_C2H6_F1 * X;
46  C2H6_no_reacciona = n_C2H6_F1 - C2H6_reacciona;
47
48  % Moles de productos formados
49
50  mol_CO2 = C2H6_reacciona * frac_CO2 * 2; % 1 mol C2H6 → 2 mol CO2
51  mol_CO = C2H6_reacciona * frac_CO * 2;   % 1 mol C2H6 → 2 mol CO
52  mol_H2O = C2H6_reacciona * 3;            % Ambas reacciones → 3 mol H2O
53
54  % O2 requerido estequiométricamente
55  O2_esteq = C2H6_reacciona * (frac_CO2 * 3.5 + frac_CO * 2.5); % oxígeno requerido estequiomét
56
57  O2_total = n_O2_F1 + O2_exceso_F2;
58
59
```

Figura 72c. Captura de pantalla de MATLAB, Script para el Ejercicio 10.

Ejercicio5.m

```
% O2 que reacciona = estequiométrico
O2_reacciona = O2_esteq;
O2_salida = O2_total - O2_reacciona;

% Salidas molares
F_C2H6_out = C2H6_no_reacciona;
F_CO_out = mol_CO;
F_CO2_out = mol_CO2;
F_H2O_out = mol_H2O;
F_O2_out = O2_salida;

% Composición total
F_total_out = F_C2H6_out + F_CO_out + F_CO2_out + F_H2O_out + F_O2_out;

% Composición molar (fracciones)
y_C2H6 = F_C2H6_out / F_total_out;
y_CO = F_CO_out / F_total_out;
y_CO2 = F_CO2_out / F_total_out;
y_H2O = F_H2O_out / F_total_out;
y_O2 = F_O2_out / F_total_out;

% Rendimiento de CO2 = (mol CO2 formados / mol C2H6 alimentados)
rendimiento_CO2 = (F_CO2_out/(n_C2H6_F1 *(2/1)))*100;

% Selectividad CO2 respecto a CO = (mol CO2 formados / mol CO formados)
selectividad_CO2_CO = mol_CO2 / mol_CO;

% Mostrar resultados
fprintf('\n--- Resultados del Balance de Masa ---\n');
```

Figura 72d. Captura de pantalla de MATLAB, Script para el Ejercicio 10.

Ejercicio5.m

```
% Mostrar resultados
fprintf('\n--- Resultados del Balance de Masa ---\n');
fprintf('C2H6 salida     = %.2f mol\n', F_C2H6_out);
fprintf('O2 salida       = %.2f mol\n', F_O2_out);
fprintf('CO2 salida      = %.2f mol\n', F_CO2_out);
fprintf('CO salida       = %.2f mol\n', F_CO_out);
fprintf('H2O salida      = %.2f mol\n', F_H2O_out);
fprintf('Flujo total     = %.2f mol\n', F_total_out);

fprintf('\n--- Composición Molar de la Corriente de Salida ---\n');
fprintf('y_C2H6  = %.4f\n', y_C2H6);
fprintf('y_O2    = %.4f\n', y_O2);
fprintf('y_CO2   = %.4f\n', y_CO2);
fprintf('y_CO    = %.4f\n', y_CO);
fprintf('y_H2O   = %.4f\n', y_H2O);


fprintf('\n--- Indicadores de desempeño ---\n');
fprintf('rendimiento CO2 = %.2f\n', rendimiento_CO2);
fprintf('Selectividad CO2/CO  = %.2f\n', selectividad_CO2_CO);
```

Ingresando los datos en el script se puede calcular y visualizar en el workspace:

Figura 73a. Captura de pantalla de MATLAB, ingreso de los datos en el script y visualización en el workspace.

Workspace

Name	Value
C2H6_no_reacciona	16
C2H6_reacciona	64
F_C2H6_out	16
F_CO2_out	96
F_CO_out	32
F_H2O_out	192
F_O2_out	632
F_total_out	968
frac_CO	0.2500
frac_CO2	0.7500
mol_CO	32
mol_CO2	96
mol_H2O	192
n_C2H6_F1	80
n_C2H6_R2	0
n_O2_F1	20
n_O2_R2	820
O2_esteq	208
O2_exceso_F2	820
O2_reacciona	208
O2_salida	632
O2_total	840
rendimiento_CO2	60
selectividad_CO2_CO	3
v_C2H6_R1	1
v_C2H6_R2	1

1x1 double

Figura 73b. Captura de pantalla de MATLAB, ingreso de los datos en el script y visualización en el workspace.

Workspace

Name	Value
frac_CO	0.2500
frac_CO2	0.7500
mol_CO	32
mol_CO2	96
mol_H2O	192
n_C2H6_F1	80
n_C2H6_R2	0
n_O2_F1	20
n_O2_R2	820
O2_esteq	208
O2_exceso_F2	820
O2_reacciona	208
O2_salida	632
O2_total	840
rendimiento_CO2	60
selectividad_CO2_CO	3
v_C2H6_R1	1
v_C2H6_R2	1
v_O2_R1	3.5000
v_O2_R2	2.5000
X	0.8000
y_C2H6	0.0165
y_CO	0.0331
y_CO2	0.0992
y_H2O	0.1983
y_O2	0.6529

Finalmente se puede visualizar los resultados en Command Window:

Figura 74. Captura de pantalla de MATLAB, visualización de los resultados en Command Window

```
Command Window

--- Resultados del Balance de Masa ---
C2H6 salida     = 16.00 mol
O2 salida       = 632.00 mol
CO2 salida      = 96.00 mol
CO salida       = 32.00 mol
H2O salida      = 192.00 mol
Flujo total     = 968.00 mol

--- Composición Molar de la Corriente de Salida ---
y_C2H6  = 0.0165
y_O2    = 0.6529
y_CO2   = 0.0992
y_CO    = 0.0331
y_H2O   = 0.1983

--- Indicadores de desempeño ---
rendimiento CO2 = 60.00
Selectividad CO2/CO  = 3.00
fx >>
```

Actividad de aprendizaje

Objetivo: Desarrollar habilidades en el uso de herramientas computacionales como Excel y MATLAB para la resolución de balances de materia, mediante la aplicación práctica de modelos en procesos químicos con y sin reacción.

Instrucciones:

Lee con atención y resuelve las siguientes preguntas utilizando Excel y/o MATLAB como herramientas principales. La actividad se puede desarrollar de forma individual o en parejas. Se espera que apliques lo aprendido en este capítulo para automatizar cálculos, organizar datos y visualizar resultados.

Parte A. Comprensión teórica

1. ¿Qué ventajas ofrece el uso de Excel y MATLAB para resolver balances de materia frente al método manual?
2. ¿Qué tipo de funciones y herramientas básicas de Excel se pueden utilizar para resolver sistemas de ecuaciones en balances de materia?
3. ¿Qué comandos fundamentales de MATLAB permiten trabajar con matrices, resolver sistemas de ecuaciones lineales y representar gráficamente los resultados?

Parte B. Desarrollo práctico en Excel

Utiliza Microsoft Excel para resolver el siguiente problema:

4. Un proceso continuo sin reacción química recibe dos corrientes:
    - Corriente A: 50 kg/h de una solución con 20% de NaCl
    - Corriente B: 80 kg/h de agua pura

    Se mezclan ambas corrientes.

a) Calcula la concentración final de NaCl (en %) en la corriente de salida.

b) Elabora una hoja de cálculo que permita cambiar los datos de entrada (flujo y concentración) y obtener automáticamente el resultado.

5. Agrega a tu hoja un gráfico que muestre cómo varía la concentración final de NaCl cuando el flujo de agua cambia entre 40 y 100 kg/h.

Parte C. Desarrollo práctico en MATLAB

Utiliza MATLAB para resolver el siguiente caso:

6. Replique el ejercicio de la pregunta 5 en Matlab.
7. Explica brevemente cómo puede integrarse este script a modelos más complejos (reactores, sistemas acoplados, etc.) y su ventaja para simulación.

Parte D. Reflexión final

8. ¿Cuál de las dos herramientas (Excel o MATLAB) te pareció más intuitiva para resolver balances de materia? Justifica tu respuesta.
9. ¿Cómo pueden estas herramientas apoyar la toma de decisiones en procesos industriales reales?
10. ¿Qué habilidades técnicas y profesionales desarrollaste al aplicar estos programas en la resolución de problemas ingenieriles?

Sugerencia docente: Puedes evaluar esta actividad con una rúbrica sencilla basada en: comprensión conceptual, aplicación correcta, claridad del diagrama y profundidad en la reflexión.

Cierre:

Trasladamos la teoría a plantillas y scripts construyendo modelos transparentes en Excel y MATLAB con entradas bien definidas, fórmulas auditables, gráficos de apoyo y rutinas de verificación numérica, que facilitan la colaboración el control de cambios y la reproducibilidad.

Como cierre conectamos estos recursos con buenas prácticas de documentación desde el versionado de archivos y el registro de supuestos, hasta la comparación automática de escenarios lo que habilita decisiones rápidas basadas en evidencia.

En la práctica estas herramientas permiten levantar gemelos digitales a nivel de operación de una línea, evaluar escenarios de qué pasa si para cambios en materia prima y especificación de producto y, construir tableros de indicadores con cierres diarios de balance y alarmas por desviaciones.

Te invito a empaquetar tu modelo favorito en una carpeta con datos de entrada, instrucciones breves y un ejemplo resuelto y, a planear como trabajo final un mini estudio de caso que combine balances de materia con costos de operación para argumentar una recomendación técnica ante un comité de planta.

Referencias bibliográficas

Boyacá Mendivelso, L. A. (2019). *Balance de materia orientado a procesos* ((ed.). Ed). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/189655

Chen, C.-T. (2022). *MATLAB Applications in Chemical Engineering*. Chyi-Tsong Chen. https://books.google.com/books?id=kpxwEAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=MATLAB+Applications+in+Chemical+Engineering&hl=es&newbks=1&newbks_redir=1&sa=X&ved=2ahUKEwiMxrn5v8mPAxWMRzABHWMNJxkQ6AF6BAgNEAM

Clough, D. E. (2016). Use Spreadsheets for excel para ingenieria quimica. *Chemical Engineering Progress*, *August*, 25–34. https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20160825_0.pdf

Dhagat, S., Jujjavarapu, S. E., Kumar, N. S. S., & Mahapatra, C. (2024). *Recent Advances in Bioprocess Engineering and Bioreactor Design*. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-97-1451-3

Felder, Richard; Rousseau, R. (2003). *Principios elementales de los procesos químicos* (Limusa Wil). https://hdquimicaeiqtotalh.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/10/libro-de-balance-felder.pdf

Fito Suñer, P. J. Castelló Gómez, M. L. & Tarrazó Morell, J. (2023). *Balances de materia y energía en ingeniería de bioprocesos: (2 ed.)* (Editorial). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/238439

Galagovsky, L., & Giudice, J. (2015). Estequiometría y ley de conservación de la masa: una relación a analizar desde la perspectiva de los lenguajes químicos. *Ciência & Educação (Bauru)*, *21*(1), 85–99. https://doi.org/10.1590/1516-731320150010006

Gallego, M. (2019). *Excel 2019: avanzado: (1 ed.).* (RA-MA Edit). https://books.google.com.ec/books?id=78y4EAAAQBAJ&pg=PT4&dq=Exc

el+2019:+avanzado:+(1+ed.).&hl=es&newbks=1&newbks_redir=1&sa=X&ved=2ahUKEwi_7tfBwMmPAxW1RjABHWi2GF0Q6AF6BAgNEAM

Garavito, N. G. (2007). *Balance De Materia Libro Guía De Clase*. 1–3. https://www.academia.edu/36750523/BALANCE_DE_MATERIA_LIBRO_GUÍA_DE_CLASE_NÉSTOR_GOODING_GARAVITO

Himmelblau, D. M. (1997). *Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química* (PRENTICE-H). https://celqusb.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/01/principios-bc3a1sicos-y-cc3a1lculos-e-ingenieria-quc3admica-himmelblau-6ed.pdf

Maroto Valiente, Á. & Muñoz Andrés, V. (2013). *Operaciones unitarias y reactores químicos* (UNED-Uni). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/48624

Martín, M. M. (2025). *Introduction to software for chemical engineers*. CRC Press. https://books.google.com.ec/books?id=MlpEEQAAQBAJ&pg=PT607&dq=Introduction+to+software+for+chemical+engineers&hl=es&newbks=1&newbks_redir=1&sa=X&ved=2ahUKEwjAw8yKwMmPAxWWRjABHQ0WNnkQ6AF6BAgNEAM

Matlab, L. (2021). MATLAB & Simulink. *Retrieved September*. https://www.mathworks.com/products/matlab.html

Monsalvo Vázquez, R. & M. del R. R. S. (2015). *Balance de materia y energía: procesos industriales* (Editorial). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/39426

Nandagopal, N. S. (2023). *Chemical engineering principles and applications*. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-27879-2

Rojas González, A. F. (2012). *Fundamentos de procesos químicos* (Universida). https://elibro.net/es/lc/utmachala/titulos/127951

Rosas-Martínez, J. M., Valero-Romero, M. J., García-Mateos, F. J., Ruiz-Rosas, R. R., Rodríguez-Mirasol, J., & Cordero-Alcántara, T. (2022). Resolución de problemas modelo de Ingeniería Química usando MATLAB. *VI Congreso de*

Innovación Docente En Ingeniería Química. https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/24752/T3_Poster_Flash_Rosas.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Zapata, A., & Artbox, E. (2012). BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA. Formulación, solución y usos en Procesos Industriales. In *BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA. Formulación, solución y usos en Procesos Industriales. Corregida y aumentada*. https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/46c24dcb-d457-41eb-83eb-01da1ff62489/content

Tanya Alexandra Carchi Tandazo es Ingeniera Química por la Universidad Técnica de Machala y Máster en Ingeniería Química por la Universitat de València, España. Docente investigadora en la Universidad Técnica de Machala e integrante del grupo BIOENG, ha dirigido proyectos sobre biomateriales a partir de residuos lignocelulósicos y publicado artículos científicos sobre remoción de contaminantes en soluciones acuosas. Ha participado como ponente en congresos nacionales e internacionales en temas de ingeniería química, medio ambiente y materiales avanzados. Actualmente cursa el Doctorado en Ingeniería Química en la Universidad del Valle, Colombia, enfocándose en valorización de residuos y bioeconomía sostenible.

Byron Lapo Calderón. Ingeniero Químico por la Universidad Técnica de Machala. Máster en Ingeniería Ambiental por la Escuela Politécnica Nacional. Doctor en Ingeniería de Procesos Químicos por la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona Tech. Estancia de investigación Erasmus de un año, en la Universidad de Minas de Freiberg, Alemania. Actualmente se desempeña como profesor-investigador en la Universidad Técnica de Machala. Líder del grupo de investigación Bioingeniería, grupo que desempeña en la producción de sustancias valiosas y biocombustibles a través de la Biorrefinería de residuos agrícolas. Es autor de más de 30 publicaciones científicas, indexadas en Scopus, principalmente Q1 y participado como ponente en varios congresos nacionales e internacionales

ISBN: 978-9942-33-952-2

9 789942 339522

Compás
capacitación e investigación