

INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA QUÍMICA

Balances macroscópicos

José María Gutiérrez (coord.)

Departamento de Ingeniería Química y Química Analítica

INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA QUÍMICA

Balances macroscópicos

José María Gutiérrez
Esther Chamarro
Alicia Maestro
Carme Sans
Ricard Torres

Departamento de Ingeniería Química
y Química Analítica

Índice

PRÓLOGO	7
1. LOS PROCESOS QUÍMICOS Y LAS OPERACIONES UNITARIAS	9
1.1. Procesos químicos, productos químicos y medioambiente	11
1.2. Operaciones unitarias: clasificación y descripción	17
1.3. Descriptiva de procesos: diagramas de flujo	26
1.4. Las instalaciones industriales: fábrica y planta química	33
1.5. Funcionamiento de las operaciones y procesos	35
Resumen del capítulo	37
Ejercicios	38
2. MODELOS MATEMÁTICOS EN INGENIERÍA QUÍMICA	41
2.1. Niveles de descripción de los modelos matemáticos	41
2.2. Variables y parámetros. Sistema de unidades	44
2.3. Ecuaciones del modelo matemático	47
2.4. Análisis de los grados de libertad de un sistema	49
2.5. Ecuaciones del modelo matemático en ingeniería química	52
Resumen del capítulo	60
Ejercicios	60
3. EL BALANCE MACROSCÓPICO DE MATERIA	63
3.1. La ecuación general del balance de materia	63
3.2. El balance de materia con reacción química	73
3.3. Balances de materia aplicados a operaciones unitarias	84
3.4. Balances de materia aplicados a sistemas con más de una unidad	89
Resumen del capítulo	111
Ejercicios	111
4. EL BALANCE MACROSCÓPICO DE ENERGÍA	121
4.1. La ecuación general del balance de energía. El balance de entalpía	121
4.2. El balance de entalpía con reacción química	143
4.3. Aplicación del balance de energía a operaciones unitarias	153
4.4. Servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento en las plantas químicas	160
Resumen del capítulo	165
Ejercicios	166

5. EL BALANCE MACROSCÓPICO DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO.....	175
5.1. Ecuación general del balance macroscópico de cantidad de movimiento	176
5.2. Aplicación del balance macroscópico de cantidad de movimiento a operaciones unitarias	181
BIBLIOGRAFÍA	185
NOMENCLATURA	187
GLOSARIO	191

PRÓLOGO

El objetivo de este libro es ayudar al estudiante en la adquisición de las competencias propias de una introducción a la ingeniería química, que incluyen un conocimiento básico de los conceptos esenciales de esta materia, así como de los procesos y operaciones, y el manejo de una herramienta fundamental como son los balances macroscópicos. Este manual está pensado para ser utilizado como complemento a la docencia presencial y a su material de apoyo.

El texto está estructurado en cinco capítulos, siguiendo los apartados de un programa básico de introducción a la ingeniería química.

El primer capítulo se centra en presentar los aspectos más importantes de la ingeniería química: procesos, operaciones unitarias y representación de los procesos.

El segundo capítulo trata de los modelos matemáticos que se emplean para representar los procesos y operaciones de la ingeniería química. Del estudio de los modelos matemáticos se deduce que los balances macroscópicos de materia y energía constituyen una herramienta fundamental de esta materia, a cuyo estudio se dedican los siguientes capítulos.

El tercer capítulo explica el balance de materia, deduciendo unas ecuaciones que relacionan entre sí las variables relevantes con la cantidad de materia. Se estudia la aplicación de los balances de materia a operaciones y procesos, y de las ecuaciones deducidas se calculan las variables pertinentes.

En el capítulo cuarto se analiza el balance de energía, derivando el balance de entalpía y las ecuaciones correspondientes a diversas situaciones. Los balances de entalpía se aplican a operaciones unitarias de la ingeniería química, sobre todo reactores, hornos e intercambiadores de calor. Se estudian, asimismo, los servicios auxiliares de las plantas químicas que implican transporte y transferencia de calor.

Por último, en el capítulo quinto, se explican brevemente los balances de cantidad de movimiento, que constituyen una herramienta que, en ingeniería química, es mucho menos utilizada que los balances de materia y energía.

Los objetivos de esta introducción a la ingeniería química son sobre todo prácticos. El estudiante debe ser capaz de plantear modelos matemáticos (conjuntos de ecuaciones matemáticas), resolverlos (determinar valores de unas variables en función de otras variables conocidas), e interpretar los resultados de forma que le faciliten la toma de decisiones. El objetivo de una asignatura de estas características es que el alumno progrese en la adquisición de esas tres competencias citadas, y es evidente que la adquisición de estas competencias requiere la realización de numerosos ejercicios. En este texto se incluyen ejemplos resueltos, que ayudan a explicar metodologías para abordar los problemas; ejercicios no resueltos en los diferentes apartados para ejercitarse en la aplicación de las metodologías que se están explicando, y ejercicios al final de cada capítulo, relacionados con el contenido global de los capítulos y que requieren que sea el alumno el que decida la estrategia de planteamiento y resolución que se debe aplicar.

Para la realización de los ejercicios son necesarios datos de propiedades de los compuestos que intervienen. Dado que con los medios actuales es relativamente fácil obtener estos datos, no se ha considerado conveniente incluir en este texto tablas de datos, para acostumar al alumno a ser él el que decida qué datos necesita y con qué precisión.

En los ejercicios resueltos se explicitan los datos utilizados. Para los ejercicios no resueltos, se espera que sea el estudiante el que decida qué precisión necesita, aun a costa de que los resultados no sean exactamente iguales de unos estudiantes a otros y de estos a los profesores.

En este texto se considera importante orientar al alumno para que el objetivo del planteamiento de los modelos matemáticos y su resolución sea facilitar la toma de decisiones. Los valores numéricos deben ser correctos, pero aun así, si no se aplican a la toma de decisiones, pierden gran parte de su utilidad. Por tanto, la capacidad para interpretar los resultados es tan importante como la obtención de los valores numéricos resultantes de la resolución del modelo matemático.

LOS PROCESOS QUÍMICOS Y LAS OPERACIONES UNITARIAS

Este primer capítulo debe servir como introducción a la *ingeniería química* y explicar los conceptos que le son propios y que la distinguen de otras ramas del conocimiento y de la tecnología.

En los estatutos de la AIChE (American Institution of Chemical Engineers), la ingeniería química se define como «la profesión en la que el conocimiento de las matemáticas, la química y otras ciencias naturales, adquirido con el estudio, la experiencia y la práctica, se aplica con criterio para desarrollar métodos económicos de uso de las materias, los materiales y la energía en beneficio de la humanidad» (AIChE Constitution, artículo III, 2016).

Se trata de una definición, aunque lo cierto es que se podrían pensar otras; sin embargo, todas ellas deben recoger qué hay que saber y la idea de que hay que saber aplicar el conocimiento a hacer cosas: inventar, diseñar, desarrollar, hacer funcionar, etc.

Se requieren conocimientos de ciencias naturales, por un lado, pero también de ciencias sociales, para que los métodos sean económicos y redunden en beneficio de la humanidad (o de la *sociedad*, en un lenguaje algo menos grandilocuente). También se necesitan conocimientos de materias instrumentales, como las matemáticas para calcular; y expresión escrita, oral y gráfica para entender o comunicar resultados. Otros conocimientos necesarios serían sobre materiales para implementar los métodos desarrollados; control y automatización para hacerlos funcionar de la mejor manera posible; legislación para que los métodos desarrollados cumplan las normativas, y alguna cosa más. Hay que tener conocimientos muy diversos y saber aplicarlos para hacer muchas cosas diferentes.

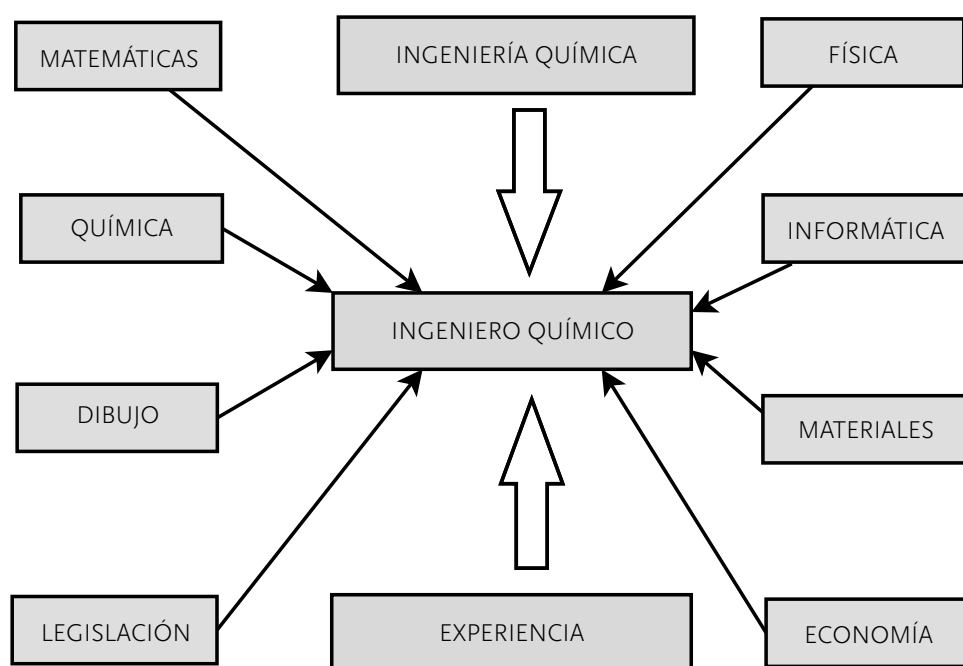


Figura 1.1. Conocimientos necesarios de un ingeniero químico.

La definición de la ingeniería química como profesión se puede complementar con alguna definición del *ingeniero químico* como profesional. Así, por ejemplo, «el ingeniero químico se ocupa de la concepción, del cálculo, del diseño, de la construcción y del funcionamiento de una instalación donde llevar a término un proceso químico o físico cualquiera» (J. Cathala, fundador de la actual École Nationale Supérieure des Ingénieurs en Génie Chimique de Toulouse, Francia; véase, por ejemplo, Grosseti y Detrez [1998]).

Según esta definición, el ingeniero químico sabe hacer cosas relacionadas con procesos químicos y físicos. La ampliación a procesos que puedan no ser químicos se debe a que los conocimientos necesarios para ser aplicados a los procesos químicos podrían ser usados en otro tipo de procesos que no impliquen cambios químicos. Un ejemplo paradigmático es el refinado de petróleo; puede no haber reacciones químicas y, sin embargo, dadas las operaciones necesarias para este proceso, el *ingeniero químico* es el único profesional con conocimientos suficientes de todas ellas para poder entender la globalidad de un proceso de refinado de petróleo.

En la figura 1.1 se pretende resumir los conocimientos necesarios que debe tener un ingeniero químico. Como es un resumen, no aparecen explícitamente materias como la biología o la geología, por ejemplo. Se ha querido resaltar la importancia de los conocimientos específicos de *ingeniería química* y de aquellos adquiridos a través de la experiencia.

En la definición de ingeniero químico, la expresión «se ocupa» implica que determina cómo actuar, de forma que la actividad del ingeniero se podría resumir en una toma de decisiones sobre los aspectos que aparecen en la definición: concepción, diseño, etc.

El ingeniero químico no puede proceder con libertad; existen restricciones naturales, como, por ejemplo, los principios de la termodinámica, que limitan su capacidad a la hora de decidir. Sus actuaciones deben cumplir, asimismo, los requerimientos de seguridad y los de protección ambiental, que estarán recogidos en la legislación, pero que pueden ser más restrictivos previendo futuras legislaciones. Por último, sus decisiones deben cumplir requerimientos específicos que puedan estar incluidos en el encargo de la tarea, como, por ejemplo, pureza del producto que se debe obtener, caudal de producción o rendimiento de las materias primas.

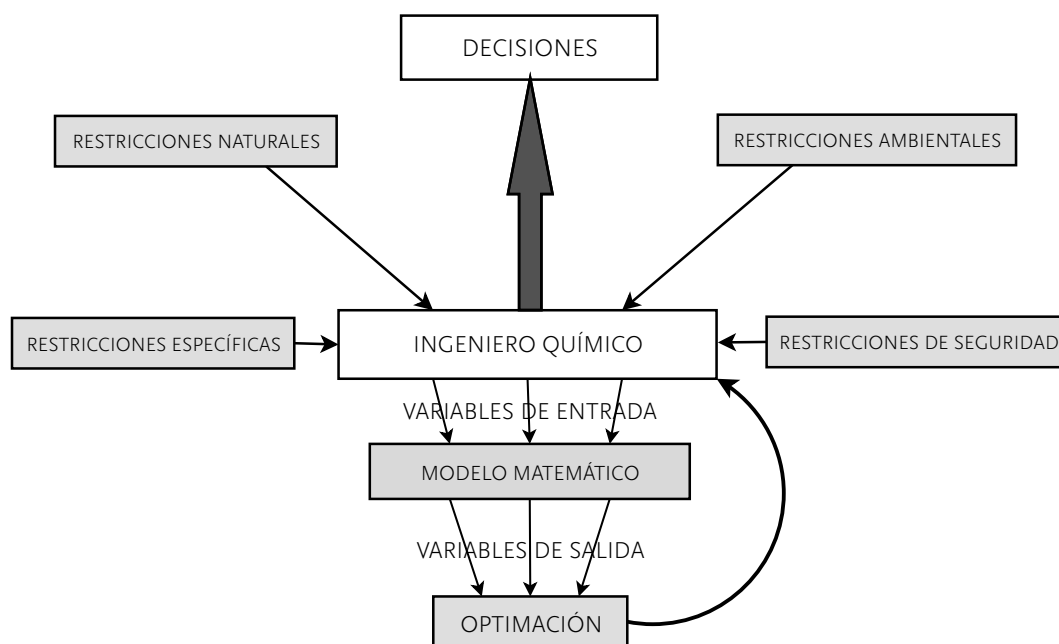


Figura 1.2. Proceso de toma de decisiones del ingeniero químico.

Con esas restricciones el ingeniero debe tomar decisiones, como puede ser establecer la temperatura que debe tener un reactor y resolver cómo se va a controlar. Para ello, se puede apoyar en un *modelo matemático*, tema del siguiente capítulo, con el cual, a partir de los valores de unas variables de entrada, se calculan los valores para unas variables de salida. Siguiendo con el ejemplo anterior, una variable de salida podría ser la temperatura que hay que establecer en el reactor. Sin embargo, el ingeniero químico no debe emplear el resultado del modelo matemático a ciegas, sino que debe interpretarlo. Esta interpretación suele incluir una optimización; por ejemplo, se podrían ir modificando los valores de las variables de entrada hasta que la temperatura implique el mejor rendimiento de las materias primas.

El resultado de la consideración de todos estos aspectos son las decisiones que debe tomar el ingeniero químico. En la figura 1.2 se resume este proceso.

En la docencia de la ingeniería química normalmente predomina la enseñanza de los modelos matemáticos que ayudan a tomar las decisiones. Sin embargo, hay que tener presente que el modelo matemático es solo una herramienta para ello. De hecho, gran parte de las decisiones del ingeniero químico en su ejercicio profesional dependen de su conocimiento y su experiencia, sin recurrir al planteamiento y la resolución de modelos matemáticos. Quizá en el ámbito académico se debería incidir más en la toma de decisiones sin la utilización de modelos matemáticos, mientras que en el ejercicio profesional más resoluciones deberían estar basadas en el empleo de dichos modelos.

La definición de ingeniero químico también incluye el concepto de proceso. En el siguiente apartado se desarrolla el concepto de proceso químico y otros conceptos relacionados con la definición de proceso.

1.1. Procesos químicos, productos químicos y medioambiente

1.1.1. Proceso químico

Un proceso es un conjunto sucesivo de las fases de un fenómeno natural o artificial. Reduciendo la definición a los propios de la profesión de ingeniero químico, un proceso químico sería el conjunto de operaciones químicas o físicas dirigidas a la transformación de unas materias iniciales en productos finales diferentes. En esta definición específica se aplica la palabra «operaciones» a las fases, dado que el fenómeno es artificial, y se especifica el objetivo del fenómeno que ocurre, es decir, transformar unas materias iniciales en productos finales.

A las materias iniciales se las denomina «materias primas», y a las materias una vez transformadas para ser comercializadas, «productos». Para efectuar la transformación se requiere energía, y de la transformación pueden resultar, además de los productos, algunos «residuos». En la figura 1.3 se resume la definición de proceso químico esquematizando las entradas y salidas.

Los procesos químicos han ido desarrollándose desde la prehistoria y a lo largo de la historia. Es indudable, y hay constancia de ello, que algunos procesos se utilizan desde la prehistoria, pero el detalle del proceso no ha sido recogido por escrito hasta tiempos que se consideran ya históricos. Así, el primer proceso detallado por escrito es la fabricación del jabón, recogida en unas tablillas sumerias, y data del año 3000 a. C.

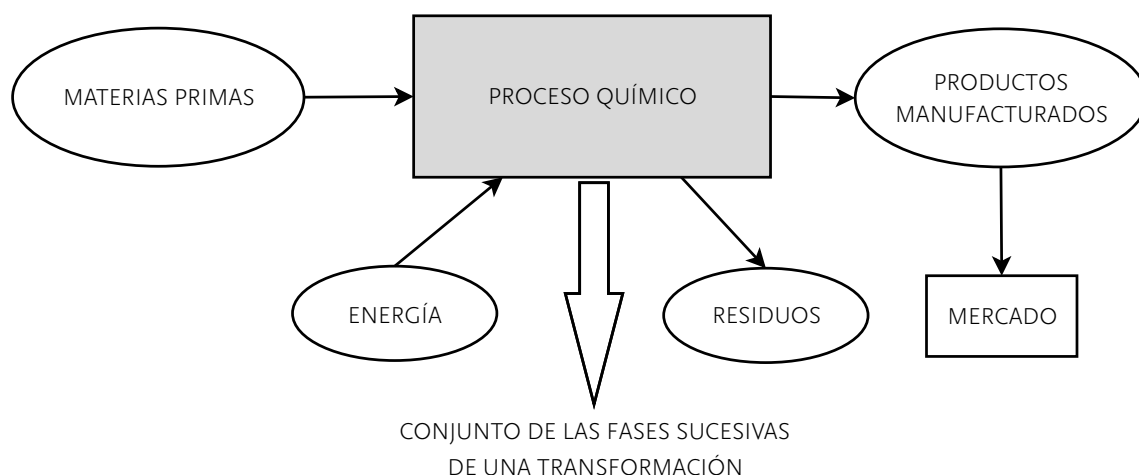


Figura 1.3. Definición de proceso químico.

En la tabla 1.1 se muestran algunos hitos que pueden ser considerados clave en el desarrollo de los procesos químicos. Al mismo tiempo, se muestran algunos hitos en el desarrollo de la formación en ingeniería química.

Tabla 1.1. Hitos en el desarrollo de la ingeniería química.

INDUSTRIA	EDUCACIÓN
Prehistoria	
• Fermentaciones alcohólicas • Colorantes (índigo) • Jabón	
Siglo XVIII	
• 1749. Ácido sulfúrico. Método cámaras de plomo • 1773. Alkali. Método Leblanc	
Siglo XIX	
• 1873. Alkali. Método Solvay	• 1887. George Davis. <i>12 lecciones de ingeniería química</i> • 1888. Lewis Norton (MIT). Primer programa de ingeniería química
Siglo XX	
• 1910. Amoníaco. Método Haber Bosch • 1940-1950. Expansión de la industria petroquímica • 1950-1960. Desarrollo de la industria nuclear • 1980. Desarrollo de la biotecnología	• 1901. George Davis. <i>Handbook of Chemical Engineering</i> • 1915. Arthur Little. Concepto de operaciones unitarias • 1922-1950. Desarrollo de las operaciones unitarias • 1960. Fenómenos de transporte • 1980. Simulación de procesos • 1990. Ingeniería del producto formulado
Siglo XXI	

Aunque los datos de la tabla sean ciertos, es discutible la importancia de los hitos que se señalan, y si existen otros de igual o mayor importancia. Quizá se podría mencionar algún logro destacado en el siglo XXI, pero si se deja así, queda más margen para que los actuales estudiantes contribuyan al desarrollo histórico de la ingeniería química.

1.1.2. Las materias primas

Las materias primas provienen de la naturaleza, por el momento del planeta Tierra, más específicamente, de las capas más externas, que son: la litosfera, la hidrosfera y la atmósfera. Además, si se desea, se puede distinguir la llamada biosfera, que se podría definir como el conjunto de materias procedentes de transformaciones biológicas, y también como la capa donde se desarrollan los seres vivos. En el ámbito de la ingeniería química, es preferible entender la biosfera de acuerdo con la primera definición.

En la tabla 1.2 se muestran ejemplos de materias primas provenientes de cada una de estas capas.

Tabla 1.2. Origen de las materias primas.

Capa de origen	Materia prima
Atmósfera	• Oxígeno • Nitrógeno • Argón • ...
Hidrosfera	• Agua • NaCl • ...
Litosfera	• Carbón • Petróleo • Minerales y rocas
Biosfera	• Celulosa y otras fibras • Polisacáridos • Proteínas • Aceites y grasas • ...

Aunque el abanico de productos es inmenso, se puede considerar que el número de materias primas básicas es limitado. Así, la enorme cantidad de compuestos orgánicos se obtiene sobre todo del petróleo. Si se quieren considerar de manera individual los compuestos de una mezcla compleja como el petróleo, la realidad es que este último se transforma en unos pocos compuestos a partir de los cuales se produce la gran variedad de compuestos orgánicos. Ejemplos de estas materias primas básicas procedentes del petróleo son el etileno, el propileno, el benceno, el tolueno, etc., y a partir de estas pocas materias primas se construyen las variadas y, con frecuencia, complejas estructuras de la gran mayoría de los compuestos orgánicos.

De estas materias primas se obtienen productos finales directamente mediante un proceso, o bien productos intermedios, que, sometidos a otros procesos, permiten conseguir otros productos.

1.1.3. Los productos químicos

Los productos químicos se clasifican de distintas formas, con fronteras entre las clases no siempre bien delimitadas. Así, por ejemplo, se podrían catalogar según el volumen de producción, y también según la distancia al consumo final. Una clasificación que tiene en cuenta ambos aspectos sería la siguiente (Costa *et al.*, 2000):

- Productos básicos.
- Productos intermedios.
- Productos químicos finos.
- Productos finales.
- Productos de consumo.

Se puede pensar en otras clasificaciones y, de hecho, han sido propuestas diferentes combinaciones, aunque se podría decir que todas ellas incluyen los productos básicos y los productos de química fina. Otra clasificación sería la propuesta del texto que se muestra en la tabla 1.3.

Tabla 1.3. Clasificación de los productos químicos.

Características	Productos			
	Química básica (<i>Commodity Chemicals</i>)	Química fina (<i>Fine Chemicals</i>)	Funcionales (<i>Specialty Chemicals</i>)	Formulados (<i>Formulated Products</i>)
Volumen de producción	Alto	Bajo	Variado	Variado
Precio	Bajo	Alto	Variado	Variado
Proceso	Simple	Complejo	Variado	Simple
Planta de producción	Específica	Multipropósito	Específica o multipropósito	Multipropósito
Pureza	Puro	Puro	Puro o mezcla	Mezcla
Aplicaciones	Muchas	Pocas	Muchas	Una o muy pocas
Calidad para la venta	Pureza	Pureza	Eficacia en su función	Aceptación mercado
Ejemplos	H ₂ SO ₄	Riboflavina	Tensioactivos	Detergente
	HCl	Imidacloprid	Colorantes	Lejía
	NaOH	Difenamina	Conservantes	Insecticida
	CH ₂ = CH ₂	L-fenilalanina	Espesantes	Pintura
	...	...	...	...

En ella se indican las características que permiten distinguir los distintos tipos de producto, y se incluye la denominación en inglés para poder relacionar esta clasificación con otras que se puedan encontrar en la bibliografía.

Las categorías de esta clasificación no siempre son excluyentes. Así, típicamente, algunos colorantes o pigmentos, además de *productos funcionales*, serían *productos de química fina*.

Los *productos de química básica*, en general, están muy alejados del punto de consumo, y pueden ser materia prima para la fabricación de otros muchos productos. Con frecuencia, en el producto de consumo no se halla como tal el compuesto procedente de la química básica. Por el contrario, los compuestos provenientes de la química fina suelen acabar formando parte, como tales compuestos, del producto de consumo, manteniendo la estructura química.

Cabe aclarar el caso de los productos funcionales. En inglés se denominan *Specialty Chemicals*, aunque su traducción literal carece de relación con sus características. Estos productos con frecuencia no tienen una estructura química específica, sino que son mezclas de

compuestos de estructura química similar. Por ejemplo, muchos espesantes son combinaciones de polímeros de distinta longitud y se denominan por un valor medio de peso molecular. Lo importante no es qué son, sino qué hacen; en el caso de los espesantes, aumentar la viscosidad.

Los *productos formulados* con frecuencia están cerca del consumo final, aunque esto no siempre es así. Por ejemplo, las taladrinas, o aceites de corte, son un producto formulado que se utiliza para trabajar el metal, mientras que el producto de consumo final serían las piezas metálicas o el producto ensamblado que se haga con ellas. La lejanía del consumo final puede hacer que no se clasifiquen como producto de consumo, aunque en realidad se consumen cuando se usan.

Los productos formulados son mezclas, que pueden ser muy complejas por su estructura y número de componentes, como un detergente en polvo, o bastante simples, como el sulfamán, una disolución acuosa de HCl. En el caso del detergente, la eficacia dependerá de la composición y de la estructura del producto, ya que es una mezcla heterogénea. Sin embargo, en cuanto al sulfamán, para una determinada composición, la estructura viene dada porque es una solución homogénea, así que la eficacia dependerá solo de la composición. Existen muchos productos formulados cuya eficacia depende de la estructura por ser mezclas heterogéneas.

1.1.4. Repercusión ambiental

Retomando la definición inicial de proceso, que implica partir de unas materias primas para transformarlas y obtener los productos deseados, se debe pensar en las repercusiones que puedan tener los procesos químicos en el ambiente.

Tal como se ha indicado, los procesos requieren energía, que puede ser renovable o no. Si el proceso utiliza energía no renovable, afectará a la disposición global de recursos, por lo que no será sostenible. Los combustibles fósiles son energías no renovables: es indudable que el gas natural, el petróleo y el carbón existen en la Tierra en una cantidad limitada, por lo que no se pueden consumir indefinidamente.

No obstante, y como muestra del progreso técnico, cabe señalar que las previsiones catastrofistas que empezaron en la década de 1970 sobre el agotamiento en breve de estos combustibles fósiles están lejos de cumplirse, a pesar del creciente consumo. Las reservas conocidas de combustibles fósiles han ido aumentando debido a la mejora de las tecnologías de exploración y explotación. No debe deducirse de esto que no puedan agotarse; muy al contrario, si los combustibles fósiles necesitan millones de años para formarse, un consumo con crecimiento exponencial podría agotarlos en decenas de años. Sin embargo, el problema de la utilización de los combustibles fósiles no es su agotamiento, sino que, mucho antes de agotarse estos recursos, el CO₂ resultante de la combustión provocaría un calentamiento global del ambiente incompatible con las condiciones de vida actuales.

Este ejemplo de obtención de energía a partir de combustibles fósiles permite agrupar la incidencia que pueden tener los procesos químicos sobre el ambiente en dos tipos de afectaciones generales:

- Agotamiento de los recursos naturales.
- Generación de materiales residuales.

El posible agotamiento de recursos afecta de forma muy diferente a las distintas materias primas; así, mientras que la disponibilidad de NaCl del agua de mar es prácticamente ilimitada, la de minerales para la obtención de algunos metales es muy limitada. El mineral

coltán, del cual se obtiene el tantalio, utilizado en un gran número de dispositivos electrónicos actuales, es un ejemplo paradigmático de la escasez de recursos.

Por otra parte, la generación de *materiales residuales* puede darse en todas las etapas del *ciclo de vida* de un producto, desde la extracción de las materias primas hasta el consumo del producto, pasando por el proceso de su producción.

La generación de materiales residuales y el agotamiento de los recursos naturales están relacionados, de manera que un menor consumo de recursos conlleva una menor producción de materiales residuales. Esta relación ha llevado a proponer la llamada estrategia de las tres erres:

- *Reducir* (disminuir el consumo de productos y la producción de materiales residuales).
- *Reutilizar* (usar varias veces un producto en la misma aplicación, en vez de desecharlo).
- *Reciclar* (obtener un producto útil o energía a partir de materiales que ya no sirven).

Estas tres erres constituyen una fórmula jerárquica que permite minimizar los materiales residuales. Pero debe tenerse en cuenta que cualquiera de las tres vías tiene límites tecnológicos y económicos que hacen que todo proceso acabe generando materiales residuales, en mayor o menor cantidad.

Los materiales residuales pueden hallarse en forma sólida, líquida o gaseosa, y en función de si se retienen en el punto de producción (envasando, por ejemplo) o si se dejan fluir hasta el medio natural (con tratamiento previo o no), se denominan «residuo» o «efluente», respectivamente. Así, por ejemplo, las taladrinas comentadas en la sección 1.1.3 se utilizan para refrigerar, lubricar y arrastrar las virutas metálicas en las herramientas de corte. Una vez usadas, se pueden guardar en bidones, que serán trasladados a una instalación externa, donde se regenerarán o se les aplicará el tratamiento más conveniente. El hecho de tener las taladrinas confinadas en un bidón las convierte en residuo. A su vez, las taladrinas son emulsiones de aceite que contienen alrededor de un 95 % de agua, de manera que, si la planta dispone de una depuradora adecuada, se puede plantear dejar fluir estas taladrinas hasta su depuradora, donde se tratarían para reducir su impacto ambiental y, después, se

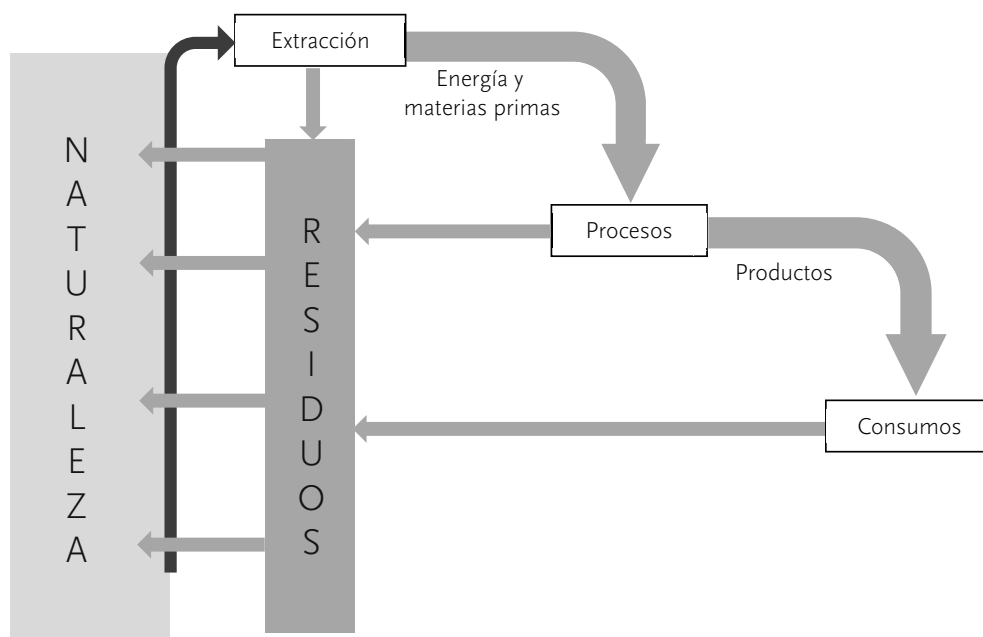


Figura 1.4. Ciclo de la materia en la naturaleza.

verterían a un medio acuático. En este caso, las taladrinas se convierten en un efluente. De una forma muy resumida, se puede decir que los tratamientos de los efluentes separan, mediante las operaciones adecuadas, la fracción que se puede liberar al entorno (aire o agua) sin problemas, y concentran la fracción de material que puede causar daños al medio, convirtiéndola en un residuo.

Cuando los materiales residuales ya han agotado todas las posibilidades de las tres erres, se devuelven al medio natural a través de instalaciones que minimicen su impacto ambiental. Si estos materiales llegaran al medio natural sin tratamiento previo, incorporarían sustancias que no deberían estar en él, es decir, añadirían contaminantes, y estos últimos podrían ocasionar daños de distinta magnitud, desde estéticos hasta amenazas a la salud y la supervivencia de distintas especies.

La figura 1.4 esquematiza estas consideraciones mostrando el ciclo de la materia que se utiliza en los procesos para fabricar productos: se extrae de la naturaleza y acaba volviendo a ella.

1.2. Operaciones unitarias: clasificación y descripción

Como se ha indicado en su definición, los procesos químicos están constituidos por distintas operaciones, algunas de las cuales se van repitiendo de unos procesos a otros. Así, por ejemplo, la operación de filtración se utiliza en muchos procesos diversos. En este apartado se estudian las operaciones que constituyen los procesos.

Las operaciones que se repiten en los distintos procesos se denominan «operaciones básicas» u «operaciones unitarias». El estudio de estas últimas puede ser útil para multitud de procesos, por lo que se ha considerado un importante avance de la ingeniería química reducir el estudio de una enorme cantidad de procesos diferentes al estudio de un número limitado de operaciones unitarias que son comunes a todos ellos.

Está fuera del alcance de un texto introductorio como este el estudio detallado de las operaciones unitarias. Sin embargo, una introducción a la ingeniería química debe incluir el concepto de operación unitaria y su clasificación para proporcionar una idea del conjunto de conocimientos necesarios para un ingeniero químico. En Costa *et al.* (2000), aparece una descripción más detallada de las operaciones unitarias. Es en los libros específicos de los distintos tipos de operaciones donde se encuentra el detalle de las operaciones unitarias que puede necesitar el ingeniero químico.

Una operación unitaria se puede definir como cada una de las acciones necesarias de transporte, adecuación y/o transformación de las materias primas implicadas en un proceso químico.

Si en un proceso se transforman las materias primas iniciales en productos finales, las operaciones unitarias tendrían como objetivo transformaciones intermedias. Las operaciones unitarias se pueden clasificar según su objetivo, es decir, según la transformación que provoquen en la materia:

- **Operaciones de cambio de composición:** reacción, mezcla o separación.
- **Operaciones de cambio de estado:** variación de temperatura, variación de estado de agregación (sólido, líquido, gas), variación de presión.
- **Operaciones de cambio de estructura:** variación de tamaño, dispersión, emulsificación, conformación.