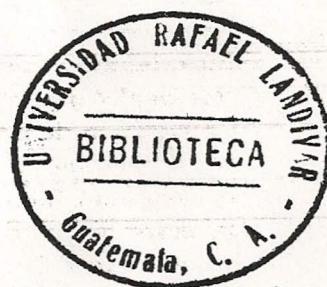


Introducción al análisis en ingeniería química

T. W. F. RUSSELL

M. M. DENN

*Profesores de Ingeniería Química
en la Universidad de Delaware.*



E D I T O R I A L L I M U S A
MEXICO **1976**

Al estudiante

Durante seis años, nos hemos dedicado a la enseñanza de cursos introductorios. La opinión de los estudiantes y nuestras propias evaluaciones concuerdan en que tales cursos han tenido éxito. En este tiempo elaboramos la presente obra, para lo cual hicimos diversas pruebas y contamos con la ayuda de diversos estudiantes y maestros. Hemos puesto lo mejor de nuestra parte para que la obra sea una expresión fiel de lo que consideramos un libro de texto efectivo; probablemente, al lector le parecerá que este enfoque es novedoso. El estudiante deberá utilizar sus conocimientos previos de física, química y matemáticas, y combinarlos con las observaciones del mundo real. También observará que es necesario utilizar las matemáticas como un lenguaje descriptivo para proporcionar información respecto a los problemas de ingeniería. Esto es común en la práctica de la ingeniería, pero representa un punto de vista que, probablemente, difiere del dado en los cursos de matemáticas.

Lo esencial del análisis es que se pueda convertir un problema de ingeniería en un enunciado matemático y, después, utilizar dicho enunciado para obtener información útil. Esto significa que es necesario aprender a *leer*. El lenguaje matemático es particularmente conveniente por su estructura simbólica y las reglas lógicas que permiten proceder a través de un problema en forma concisa y sistemática. Al familiarizarse lo suficiente con esta forma de pensar, el emplearla resulta un placer. Sin embargo, como sucede con cualquier lenguaje nuevo, las etapas iniciales del aprendizaje pueden parecer difíciles. Aún quien tenga experiencia debe leer despacio el lenguaje matemático, utilizando lápiz y papel y deteniéndose frecuentemente para efectuar o verificar las manipulaciones indicadas. No existe otra forma en que se pueda adquirir un dominio verdadero del lenguaje como una herramienta de trabajo.

El material de este texto lo pueden aprender los estudiantes que comienzan sus estudios de ingeniería química. Esto lo pudimos comprobar satisfactoriamente durante los seis años de actividad escolar y de prueba que precedieron a la publicación de esta obra. El material se ha utilizado también en cursos introductorios para estudiantes de otras áreas, como estudiantes de química, educación secundaria, biología e ingeniería eléctrica. El texto hará recapacitar al lector sobre la relación que existe entre los

22 Al estudiante

experimentos de laboratorio y el diseño de ingeniería. Requerirá que se repase el material que ya se conoce de química y física, así como *utilizar* sus conocimientos de cálculo; también encontrará que, a menudo, es necesario hacer referencia a los textos de cálculo o al repaso de notas matemáticas de los capítulos 15 a 17.

Este texto no es un resumen de todas las áreas importantes de la ingeniería química, y no debe cometerse el error común de creer que análisis e ingeniería son sinónimos. El análisis puede aplicarse a diversas clases de problemas que no se tocan en este libro, y la capacidad para efectuar un análisis es un elemento necesario para el estudio de la ingeniería. Sin embargo, la ingeniería va más allá del análisis.

La función del análisis

1.1. INGENIERIA QUIMICA

La ingeniería química es la profesión que requiere la aplicación creativa de principios científicos tales como los conceptos de masa, energía, cantidad de movimiento y cambio físico y químico de la materia. Para comprender todo lo que implica esta definición, basta considerar el tipo de problemas que los ingenieros químicos han resuelto en las últimas décadas, aunque se han dedicado casi exclusivamente a la química de los procesos industriales. Como resultado, tradicionalmente se ha considerado que la ingeniería química es una carrera para capacitar científicos que se dedicarán a la investigación, desarrollo, diseño y a las operaciones de las industrias químicas, petroquímica y afines. La experiencia ha demostrado que los principios que se requieren para satisfacer las necesidades de las industrias de proceso, también se pueden aplicar a una gran variedad de problemas, y el ingeniero químico moderno está utilizando estos elementos para tratar nuevas áreas como son las ciencias ecológicas.

Durante el siglo veinte la ingeniería química se ha desarrollado como una disciplina aparte, a fin de resolver las necesidades de una industria química en la que ya resultaban inoperantes los procesos de fabricación, que en muchos casos eran simplemente versiones a gran escala del equipo de laboratorio. Por lo tanto, la ingeniería química dio inicialmente mayor importancia a la forma de utilizar los resultados de experimentos del laboratorio para diseñar equipos de proceso que satisficieran el ritmo industrial de producción. Esto condujo de modo natural a definir los procesos de diseño en función de las *operaciones unitarias*, o sea aquellos elementos que son comunes a muchos procesos diferentes. Las operaciones unitarias básicas son: flujo de fluidos, transmisión de calor, destilación, extracción, etc. Un proceso de fabricación típico está formado por

24 La función del análisis

combinaciones de las operaciones unitarias. Por consiguiente, para diseñar cada una de las unidades a nivel de producción se requiere la misma habilidad que para diseñar del proceso total.

El concepto de operaciones unitarias que predominó en la enseñanza y la práctica de ingeniería química hasta la segunda mitad de la década de 1950, cuando surgió un movimiento que se alejó de esta corriente orientada hacia el equipo para aproximarse a una *ciencia de la ingeniería*. Partiendo de la premisa que al hacer énfasis en las operaciones unitarias no se destaca lo suficiente las semejanzas entre muchas operaciones a nivel básico; por tanto, según este enfoque, el concepto unificador no se basa en estudiar las operaciones específicas del procesamiento, sino en comprender los fenómenos fundamentales que intervienen en el transporte de masa, energía y cantidad de movimiento, los cuales son comunes a todas las operaciones unitarias.

Aunque no hay un conflicto real entre los fines del estudio de las operaciones unitarias y de la ingeniería, ésta ha dado mayor importancia a los conocimientos de matemáticas y resta importancia a los aspectos de diseño en la enseñanza de ingeniería. Este conflicto no debe existir, y por lo tanto, la enseñanza moderna se orienta hacia el desarrollo de las aptitudes que permitirán al ingeniero utilizar los conceptos fundamentales, o sea, una síntesis de la ciencia de la ingeniería y de las operaciones unitarias. Para alcanzar esta meta es esencial tener la capacidad de expresar concisamente los procesos de ingeniería y hacerlo en términos cuantitativos. Sólo en esta forma es posible que el ingeniero químico formule correctamente, interprete y utilice tanto los experimentos fundamentales como los principios físicos y los aplique en el trabajo real, fuera del laboratorio. Esta capacidad es diferente de su habilidad matemática y es lo que se llama *análisis*.

Este es un libro de texto básico de análisis para ingenieros químicos. Por lo tanto, se ha orientado hacia las aplicaciones de proceso, a pesar de la amplitud de los estudios de ingeniería. Esto no se debe a que la obra sea anticuada, sino a la creencia de que estudiar las aplicaciones tradicionales es la mejor manera de aprender los principios de transporte y cambio, que son los de mayor aplicación. El estudiante interesado en estudiar las aplicaciones más recientes —por ejemplo en ciencias biológicas— encontrará que este libro le es igualmente útil para sus estudios en el área hacia la cual se ha orientado.

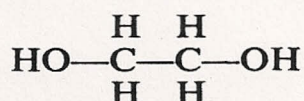
1.2 PROBLEMAS DE INGENIERIA QUIMICA

En esta sección se plantean tres problemas que servirán para ilustrar la forma en que, generalmente el ingeniero químico aborda un problema, las clases de equipo que utiliza más, las características comunes a los tres

problemas y, finalmente, de qué manera se relaciona el análisis con cada uno de éstos.

Ejemplo 1.1

Encuentre la forma de producir 100 millones de libras por año de monoetilenglicol



El etilenglicol es un líquido incoloro e inodoro semejante al agua, pero más denso y más viscoso; se usa para fabricar anticongelantes y es una de las sustancias orgánicas producidas en mayor cantidad por la industria química. En los Estados Unidos, las ventas de estos productos son de aproximadamente 1500 millones de libras al año. Todos los glicoles están constituidos por moléculas orgánicas, cada una de las cuales tiene dos grupos oxhidrilo (-OH); su gran importancia química se debe a que los glicoles son muy buenos solventes para muchos compuestos orgánicos. Los glicoles son solubles en el agua y pueden reaccionar químicamente por medio de uno de sus dos grupos hidroxílicos o ambos, para formar otros compuestos. El monoetilenglicol no existe en forma natural por lo que debe fabricarse en forma industrial.

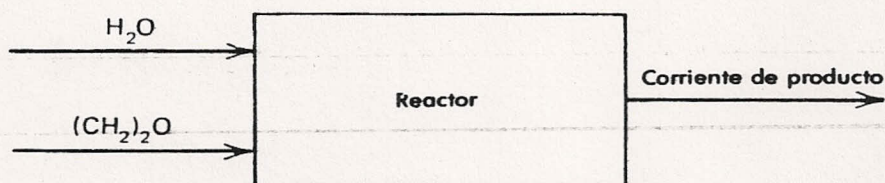
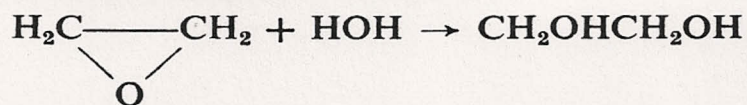


FIGURA 1.1 Reactor en el que se forma etilenglicol a partir de agua y óxido de etileno.

Los experimentos de laboratorio han demostrado que puede producirse etilenglicol por diversos métodos:

1. Por hidratación del óxido de etileno

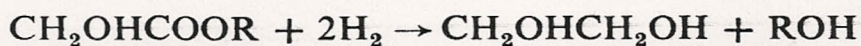
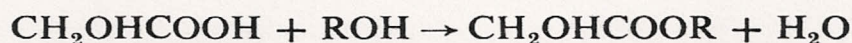
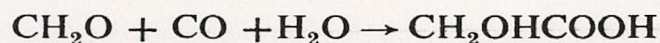


2. Por hidrólisis de la etilenclorhidrina



26 La función del análisis

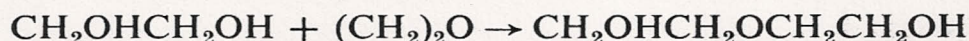
3. A partir del formaldehído y el monóxido de carbono



Aquí se simplificará bastante el estudio y sólo se considerará el primer método, es decir, la hidratación del óxido de etileno. El óxido de etileno puede obtenerse por oxidación del etileno y es fácil conseguirlo; ya que en los E.E.U.U. la producción anual sobrepasa los 1500 millones de libras por año.

Obviamente, lo primero que se necesita para el proceso o fabricación del etilenglicol es disponer de un recipiente —un *reactor*— en el que el óxido de etileno y el agua se pongan en contacto para reaccionar. Esquemáticamente, se puede ilustrar esta primera etapa como en la figura 1.1. Por supuesto, en el flujo de *producto*, habrá etilenglicol, pero también puede haber otras sustancias; por ejemplo, haber agua que no haya reaccionado y/u óxido de etileno. El grupo oxhidrilo es muy reactivo y también deben considerarse cuando menos las siguientes reacciones:

1. Formación de dietilenglicol a partir del etilenglicol



2. Formación de trietilenglicol a partir del dietilenglicol



Siguiendo las reacciones que ocurren en el proceso se tendrá en consideración la posibilidad de que se necesite una unidad para eliminar agua, otra que elimine el óxido de etileno que no reacciona y una o más unidades donde se separen el monoetilenglicol de los di y triglicoles. Tal proceso se muestra esquemáticamente en la figura 1.2.

Este diagrama de bloques del proceso abarca solamente la primera etapa de la solución al problema expuesto aquí. Para establecer un diseño preliminar del proceso deben resolverse las siguientes preguntas:

1. ¿Qué factores controlan las cantidades de mono-, di- y triglicoles en el efluente del reactor?
2. ¿Qué tamaño debe tener el reactor para obtener una producción de 100 millones de toneladas por año de monoetilenglicol y qué forma debe tener?

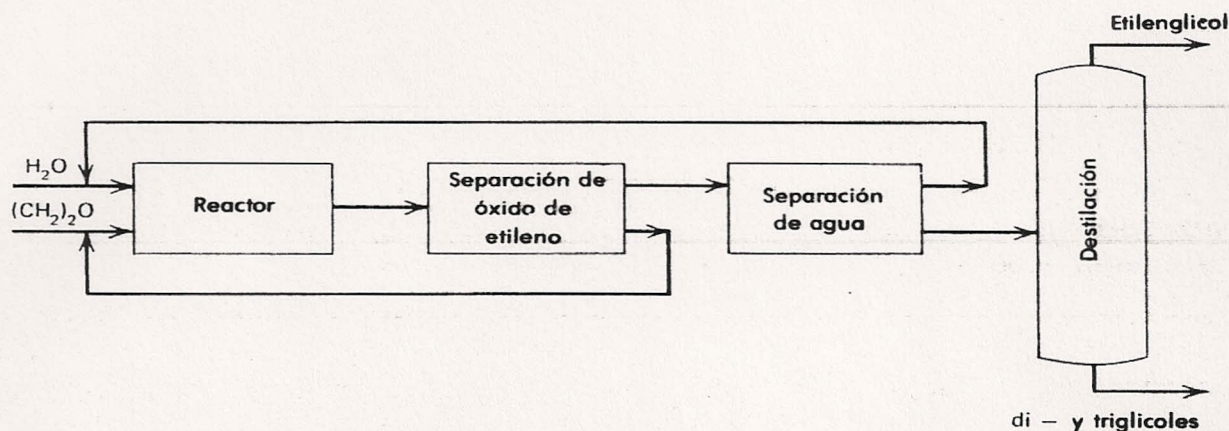


FIGURA 1.2 Diagrama esquemático de un proceso para fabricar etilenglicol.

3. ¿Qué clase de equipo se necesita para separar el agua y el óxido de etileno del efluente del reactor y qué cantidad separarse de cada uno de éstos?
4. ¿Qué clase de unidad se necesita para separar entre sí los glicoles?

Para contestar las dos primeras preguntas, primero debe hacerse una serie de experimentos químicos en el laboratorio. En este caso se está empleando un producto químico tan conocido como el etilenglicol que se ha fabricado desde hace muchos años y, por lo tanto, ya se sabe perfectamente cuáles son los resultados de tales experimentos. Los experimentos de laboratorio se efectúan usualmente en pequeños *reactores intermitentes*, que son unos recipientes donde se colocan las materias primas para observar el progreso de la reacción durante un tiempo determinado. Respecto a los glicoles, estos experimentos demuestran que las cantidades relativas de mono-, di- y triglicoles dependen de la relación del óxido de etileno con el agua que haya en el reactor al iniciarse el experimento. Los experimentos efectuados a diferentes temperaturas muestran que éstas no influyen en las cantidades relativas de los tres glicoles, pero la velocidad a que éstos se forman sí depende en gran medida de la temperatura.

La planeación, interpretación y uso de estos experimentos requiere del análisis. Es necesario deducir un conjunto de ecuaciones que constituyen el *modelo matemático* y que describen el experimento de laboratorio. La precisión de tal modelo depende de su eficacia para predecir los resultados de los experimentos de laboratorio en condiciones cambiantes, y el modelo se emplea para asegurar que se cubre el rango de resultados importantes en la reacción. También deberá elaborarse un modelo de reactor para un procesamiento continuo. En los capítulos 5 y 7 se observará que para ambos modelos se requiere la misma información acerca de la velocidad a que se

28 La función del análisis

efectúa la reacción química. De esta manera, la información que se obtiene en el laboratorio puede aplicarse a un tipo diferente de reactor al nivel de producción. Entonces puede examinarse el modelo matemático de la unidad industrial para determinar la composición del efluente en diversas condiciones de operación, de tal manera que pueda seleccionarse el tamaño, configuración y producción óptimos. En la sección 7.6 se estudiará este problema específico.

El criterio que se sigue para separar los diversos tipos de glicoles es semejante. Deberán utilizarse experimentos de laboratorio con datos registrados en manuales junto con la construcción o el desarrollo de modelos matemáticos para el diseño final. Por ejemplo, se puede separar el agua de los glicoles mediante la evaporación del agua y la recolección del vapor de condensación. (El agua hierve a 100°C ; todos los glicoles hierven a temperaturas superiores a 197°C .) La mezcla que fluye en forma continua deberá calentarse con un equipo como el *intercambiador de calor* que se muestra esquemáticamente en la figura 1.3. En el modelo se debe considerar la velocidad a que debe transferirse el calor entre las dos corrientes, con objeto de que el diseñador pueda seleccionar la temperatura y la velocidad de flujo de la corriente; el área de contacto entre la línea de vapor caliente y la línea de glicol-agua etc. Los problemas de transferencia de calor de este tipo se estudian en el capítulo 11.



FIGURA 1.3 Diagrama esquemático de un intercambiador de calor.

Ejemplo 1.2

Diseñe una unidad de tratamiento secundario que procese 60 millones de galones diarios de desperdicio doméstico de tal manera que puedan descargarse en corrientes de agua natural sin producir efectos dañinos.

En un tratamiento secundario del desperdicio, las sustancias orgánicas que se encuentran disueltas se eliminan por oxidación, formando dióxido de carbono y agua. El reactor empleado usualmente para este proceso es un

gran tanque abierto que contiene tuberías en el fondo, por donde entra aire al tanque. Las condiciones para el diseño básico son: la relación de la pureza del efluente respecto al tamaño del tanque, el diseño de la tubería aspersora de burbujas, y la velocidad de alimentación del aire.

En este caso, la aplicación del análisis al proceso es más complicada que en el problema del glicol. El conocimiento de la reacción de oxidación llevada a cabo es incompleto, dado que, por lo general, se encuentran presentes gran número de especies orgánicas de composición desconocida. Normalmente las reacciones que se llevan a cabo se catalizan mediante enzimas, las cuales son producidas por microorganismos vivientes que se encuentran en el desperdicio. De esta manera, la velocidad de oxidación en el desperdicio está relacionada íntimamente con la velocidad de reproducción, crecimiento y muerte de estos organismos. Además, el sistema consta de tres fases: agua, aire y partículas sólidas porosas de microorganismos. La velocidad del proceso total depende en parte de la velocidad a que se disuelve el oxígeno en el líquido, la velocidad a que el oxígeno y las sustancias orgánicas se mueven a través de las partículas sólidas de las células, y a través de las paredes de las mismas, etc. O sea, la reacción química entre la sustancia orgánica y el oxígeno está determinada parcialmente por un fenómeno de naturaleza no química, llamado velocidad de transferencia de masa.

Es posible aislar experimentalmente muchos de estos fenómenos y obtener modelos de ellos. En el capítulo 8 se tratarán en particular las velocidades de transferencia de masa y, en la sección 3.5.3 las velocidades a que se elevan las burbujas en un líquido. Actualmente, los métodos de diseño para instalaciones de tratamiento no pretenden desarrollar detalladamente la química de este tipo de reacciones, sino que se basan en la estimación total del contenido orgánico, denominado demanda biológica de oxígeno (DBO). La DBO es la medida de la cantidad de oxígeno consumida por una cantidad de desperdicio inoculada al microorganismo, en un reactor intermitente de laboratorio, durante un periodo de cinco días. Durante el experimento DBO se puede registrar la masa total del organismo como una función del tiempo. DBO puede ser el equivalente de una especie química reactiva, equiparable al óxido de etileno en el ejemplo anterior. En principio, el problema del diseño es semejante al del glicol, excepto que ahora el modelo para el proceso a escala industrial debe considerar no sólo la velocidad de reacción química, sino también las velocidades del crecimiento bacteriano y los procesos de transferencia de masa. En la sección 8.5 se considerará un caso más sencillo de una reacción química asociada con transferencia de masa. Esta ilustrará el enfoque básico, ya que el problema de una planta de tratamiento de desperdicio es demasiado complejo para un texto de introducción.

30 La función del análisis

Ejemplo 1.3

Considere la fabricación de un aparato o aditamento que pueda ser empleado para simular las funciones del riñón humano.

A menudo se comenta que el cuerpo humano es simplemente una planta química compacta y compleja. Por supuesto esto es una simplificación engañosa. No obstante, ciertas funciones fisiológicas tienen una gran semejanza con las unidades de procesamiento químico. El riñón, elimina los productos metabólicos de desperdicio, así como algunos venenos de la sangre; regula el balance ácido-básico del cuerpo mediante transferencias de iones entre la sangre y otros fluidos; participa en otros procesos como por ejemplo: la formación de glóbulos rojos y regula la presión sanguínea. Los dos primeros pueden ser representados esquemáticamente según se indica en la figura 1.4. Los materiales de bajo peso molecular — productos metabólicos (por ejemplo, urea), venenos (por ejemplo, barbituatos) y iones Na^+ y H^+ etc. Se mueven a través de membranas con pasajes demasiado pequeños para permitir movimientos de importancia a proteínas de alto peso molecular como la hemoglobina.

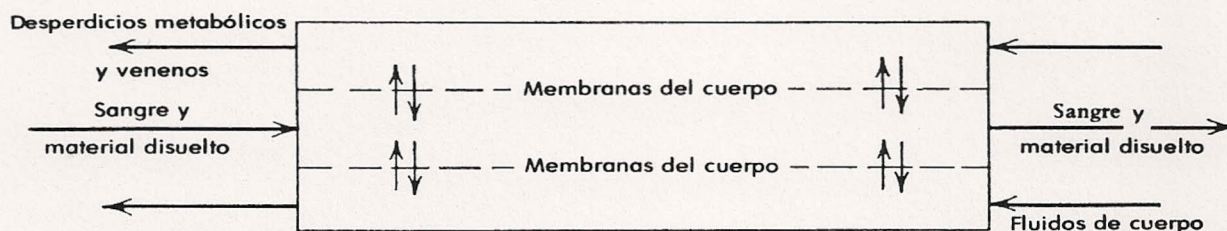


FIGURA 1.4 Diagrama esquemático de un riñón.

Al aparato que se utiliza en los hospitales para reemplazar algunas funciones del riñón se le denomina *hemodializador*, o más comúnmente riñón artificial. La diálisis es un proceso que consiste en colocar una membrana entre dos líquidos, la cual permite el paso a pequeñas moléculas, y retiene las grandes. Se emplea comercialmente en la purificación de azúcar que contiene pequeñas cantidades de sustancias de alto peso molecular. El hemodializador se muestra esquemáticamente en la figura 1.5. La sangre que fluye de una arteria localizada en la muñeca, pasa a través de una membrana de celofán cuyos poros son demasiado pequeños y no permiten que se muevan las proteínas.

Al otro lado de la membrana hay un baño de una solución de NaCl , NaCOCH_3 , KCl , CaCl_2 , MgCl_2 , y dextrosa. La urea, y otros desperdicios y venenos, como los barbituatos de la sangre pasan a través de la membrana

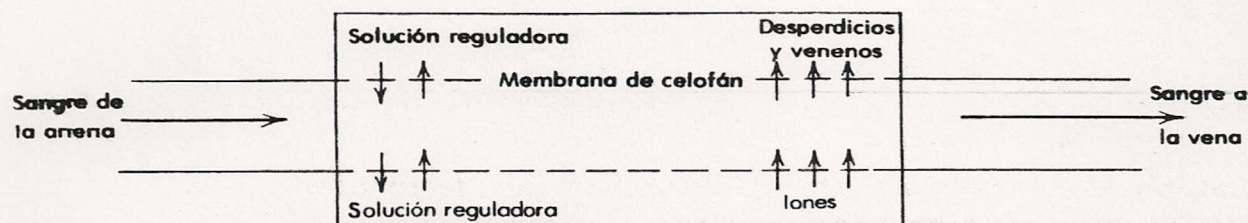


FIGURA 1.5 Diagrama esquemático de un hemodializador.

(de la misma manera lo hacen algunos aminoácidos esenciales y vitaminas que no son eliminados por el riñón natural), mientras que los iones del baño pasan en la dirección opuesta. A continuación la sangre regresa a una vena que también se encuentra en la muñeca. No se habla de los tratamientos necesarios para evitar la coagulación de la sangre.

Con objeto de obtener un diseño y un funcionamiento eficientes del hemodializador será necesario responder a varias necesidades. Las más evidentes son la elaboración de membranas biológicamente neutras, eficientes y con poros de un tamaño adecuado. Actualmente es una ciencia empírica que se aplica poco en el análisis. Sin embargo, para una membrana dada, es necesario determinar las velocidades de transferencia para diversas especies, dentro de un intervalo de condiciones de flujo, con objeto de incorporarlas al diseño del modelo. Las cantidades cuyo cálculo es pertinente son los espacios entre membranas, el área de contacto, y el número de rutas de flujo paralelas.

Se han propuesto otras alternativas a la diálisis. Por ejemplo, se utiliza el carbón activado para el proceso de purificación porque absorbe el material en su superficie. Se ha estudiado el uso de una columna llena de gránulos de carbón a través de la cual pasa la sangre, como medio de eliminar las sustancias de desecho. Las preguntas obvias que surgen son qué tamaño deben tener los gránulos y cuál debe ser la longitud de la columna.

1.3 CONCLUSIONES

Los procesos estudiados en los ejemplos anteriores tienen algunas características comunes, a pesar de la variedad de las aplicaciones. Implican reacciones químicas, cambios de estado de la materia, y la transferencia de sustancias, energía y cantidad de movimiento, aunque quizá esta última no sea tan obvia como las otras dos. Estos procesos de cambio y de transporte se llevan a cabo dentro de unidades tales como un reactor y un intercambiador de calor; los datos necesarios para evaluar, diseñar, y operar el proceso total son la relación existente entre las variables de funcionamiento y de diseño de estas operaciones unitarias, la composición y las propiedades de las corrientes de salida.

32 La función del análisis

Al análisis de la ingeniería química le corresponde analizar los procesos de velocidad, de transporte y de cambios químico y físico y la expresión cuantitativa de estos procesos. Esta expresión cuantitativa se aplica entonces a las unidades de interés para obtener *modelos matemáticos* relativos al comportamiento del proceso y al efecto de las variables que están a disposición del ingeniero. La descripción matemática es importante no sólo porque es una forma concisa y efectiva de comunicar la información, sino porque la descripción matemática de un fenómeno como el comportamiento de un reactor químico, puede manipularse conforme a las reglas matemáticas prescritas para proporcionar información esencial, concerniente al funcionamiento y capacidad esperados. Es necesario comprender perfectamente el uso de los modelos matemáticos para definir apropiadamente, organizar y entender los problemas de ingeniería química.

En forma más específica, esto significa que en el análisis intervienen técnicas sistemáticas que conducen a las siguientes operaciones:

1. Descripción de una situación física en símbolos matemáticos.
2. Manipulación del modelo matemático para determinar el comportamiento deseado de las condiciones físicas.
3. Comparación del modelo con la situación física real.
4. Estudio cuidadoso de las limitaciones del modelo matemático.
5. Uso del modelo para diseñar el equipo y prever el funcionamiento.

En los siguientes capítulos se examinarán primero las bases principales del análisis y luego se aplicarán estos principios a una variedad de situaciones de interés práctico en la ingeniería química.

Puede ser interesante complementar el breve tratado de ingeniería química contenido en este capítulo. En el siguiente libro puede encontrarse un estudio de los aspectos tradicionales:

1.1 Killeffer, D. H; *Chemical Engineering*, Doubleday, Nueva York, 1967. Killeffer se concentra en el desarrollo de varios procesos específicos con que se demuestra nítidamente tanto la práctica de la ingeniería química, como la evolución de la tecnología y las funciones respectivas del químico y del ingeniero químico. Otra fuente de gran valor lo constituye:

1.2 *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 2nd Ed; Interscience, Nueva York, 1963.

Cada sección de la enciclopedia Kirk-Othmer trata de la historia, la química y las operaciones de fabricación de cada uno de los materiales. En esta etapa es necesario investigar en diferentes materias. En particular conviene ver las secciones correspondientes a: amoníaco, glicoles, penicilina, procesos de refinación del petróleo, poliamidas (nylon) y ácido sulfúrico. La penicilina se estudia detalladamente en:

- 1.3 "The History of Penicillin Production," *Chemical Engineering Progress Symposium Series No. 100*, Vol. 66 (1970).

La publicación *Symposium Series* se hace en forma periódica y cada número está dedicado a un tema específico. También puede ser útil consultar dos textos que contienen numerosas descripciones de procesos, y que pueden comprenderse teniendo conocimientos básicos de química:

- 1.4 P. H. Groggins, Ed; *Unit Processes in Organic Synthesis*, McGraw Hill, Nueva York, 1958.

- 1.5 R. N. Shreve, *The Chemical Process Industries*, 2nd. Ed; McGraw Hill, Nueva York, 1956.

Puede encontrarse una introducción accesible al procesamiento de polímeros en la primera, cuarta y quinta secciones de:

- 1.6 F. W. Billmeyer, Jr; *Textbook of Polymer Science*, Interscience, Nueva York, 1962.

y en los Capítulos 5 y 12 de:

- 1.7 F. Rodríguez, *Principles of Polymer Systems*, McGraw-Hill, Nueva York, 1970.

Los aspectos de ingeniería del tratamiento de aguas de desecho se resumen en un artículo de la publicación *Power*:

- 1.8 R. H. Marks, "Waste-Water Treatment", *Power*, junio 1967.

En las siguientes tres colecciones se halla una investigación de las actividades relativas a la fisiología, realizadas por ingenieros químicos; sin embargo, es hasta cierto punto incompleta y su énfasis no es el adecuado.

- 1.9 D. Hershey, Ed; *Chemical Engineering in Medicine and Biology*, Plenum, Nueva York, 1966.

- 1.10 "Chemical Engineering in Medicine", *Chemical Engineering Progress Symposium Series No. 66*, Vol. 62 (1966).

- 1.11 "The Artificial Kidney", *Chemical Engineering Progress Symposium Series No. 84*, Vol. 64 (1968).

La mayoría de las bibliotecas tienen las publicaciones de la Annual Conference on Engineering in Medicine and Biology de los Estados Unidos.