

En 1988, una conferencia única fue llevada a cabo para buscar caminos de desarrollo y difusión rápida de materiales educativos sobre nuevas tecnologías. Aunque hayan pasado ya seis años desde que se realizó, este escrito de Sandler y Finlayson tiene sin duda actualidad en el ambiente hispanoamericano y mundial, por lo que se juzgó adecuada su traducción, a iniciativa del doctor Armando Rugarúa.

La enseñanza de la Ingeniería Química en un ambiente en transformación

Stanley I. Sandler y Bruce A. Finlayson***

Los ingenieros químicos estamos trabajando cada vez con mayor frecuencia en campos ajenos a nuestras tradiciones, añadiendo a nuestras actividades áreas tales como el procesamiento de materiales electrónicos, fotónicos y bioquímicos, estudios ambientales, administración y evaluación de riesgos y aplicaciones biomédicas. Además, se espera que las oportunidades de empleo en estas áreas de nuevas tecnologías aumenten en los próximos años. Para que los ingenieros químicos jueguen un papel importante en ellas es necesario que estén capacitados en los principios de la ingeniería química y que se familiaricen con estos nuevos campos de aplicación. Una pregunta básica para la docencia de la ingeniería química es cómo planear tal tipo de educación.

Existen varias escuelas de pensamiento respecto a la forma en que puede darse este cambio en la educación. Una manera es reducir o eliminar cursos básicos en el currículo de la ingeniería química para hacer espacio a cursos especializados en nuevas áreas tecnológicas. Sin embargo, como los principios de la ingeniería química también son necesarios para estas nuevas aplicaciones y como actualmente hay carencia de libros y de docentes bien preparados para enseñar tales cursos, no es una solución práctica para la mayoría de las escuelas, por lo menos a corto plazo. Una opción es incluir ejemplos de estas nuevas tecnologías en los cursos básicos, remplazando los ejemplos que se incluyen en los libros de texto actuales.

En un esfuerzo por desarrollar y difundir con rapidez materiales educativos sobre nuevas tecnologías, se sustentó la Conferencia Chemical Engineering Education in a Changing Environment, del 17 al 22 de enero de 1988 en Santa Barbara, California, auspiciada por el American Institute of Chemical Engineers, la Engineering Foundation y la National Science Foundation. Cada orador en esta Conferencia debía dar una pequeña introducción al campo tecnológico en que era experto, identificar áreas en las que los principios de la ingeniería química hubiesen sido utilizados para resolver problemas importantes y desarrollar ejemplos específicos y problemas de tarea que pudiesen ser incorporados de inmediato en los cursos básicos de la ingeniería química por profesores de todo el país.

Las memorias de esta Conferencia, incluyendo las ilustraciones y ejemplos (con soluciones) especialmente preparados,

serán publicados en breve por la Engineering Foundation y serán distribuidas por el American Institute of Chemical Engineers. Se espera que estas memorias sean la primera obra de consulta para que el profesorado de ingeniería química introduzca ejemplos de las nuevas tecnologías en el currículo tradicional. Ya que parte del material presentado está siendo utilizado por los participantes en las aulas, la Conferencia ha tenido gran impacto en la enseñanza de la ingeniería química desde 1988.

Las sesiones de los cinco días de la Conferencia, consagradas a las presentaciones formales y a las discusiones informales, fueron organizadas según las áreas de aplicación: Ingeniería Bioquímica y Biomédica, Administración y Evaluación de Riesgos, Procesamiento de Materiales Avanzados, Procesamiento de Materiales Electrónicos y Fotónicos, y Procesos de Separación. La siguiente es una breve descripción de los temas y de los materiales de enseñanza estudiantil presentados por cada ponente.

Ingeniería Bioquímica y Biomédica

John Jost, de Genentech, describió un modelo de mezclado a nivel celular en fermentadores tipo tanques de mezclado y después comentó la información con la cual el estudiante puede deducir los coeficientes de transferencia de masa que regulan el intercambio entre diferentes zonas del fermentador. Estos coeficientes permiten al estudiante escalar el fermentador, obtener información sobre el aumento de pH durante los fenómenos transitorios en la operación por lotes y calcular el efecto de un mezclado deficiente en el funcionamiento del fermentador.

Michael Shuler, de la Universidad de Cornell, describió las reacciones enzimáticas y dio datos para que el estudiante los empleara en la obtención de parámetros cinéticos. Después discutió problemas del factor de efectividad que implican el balance entre reacción y difusión. Se incluyeron reactores de fibra hueca con reacciones enzimáticas localizadas únicamente en la superficie.

Dale Peterson, de Du Pont, describió la terapia para el cáncer que utiliza células "matadoras" activadas con linfocina, en la cual los linfocitos de la sangre son retirados del paciente y por medio de una separación por afinidad se obtienen las células específicas que son cruciales para el tratamiento. El análisis del proceso incluye el movimiento y la difusión de las células en un campo de velocidad parabólica, demostrando así un uso importante de estudios de mecánica de fluidos en migración de partículas en medicina. Un segundo problema se refirió al equilibrio en la

* Univ. de Delaware, Newark. ** Univ. of Washington, Seattle.
Traducción de la revista *Chemical Engineering Progress*, junio de 1988, páginas 32-35.

purificación de la médula ósea.

Edwin Lightfoot, de la Universidad de Wisconsin, explicó los altos costos de los materiales no deseados en un bioproceso e hizo énfasis en la necesidad de tomar esto en cuenta en la síntesis del proceso. Proporcionó ejemplos en los cuales los coeficientes limitantes de transferencia de masa se obtienen de las soluciones a la ecuación de difusión y al problema de Graetz. La analogía entre flujo del fluido y transferencia de calor fue usada para elegir una geometría para minimizar los costos del manejo de fluidos mientras se mantiene el rango deseado en la transferencia de masa. Las aplicaciones incluían filtración, centrifugación, magnetoforesis y dielectroforesis.

Robert Dedrick, de los Institutos Nacionales de Salud, describió el metabolismo de la citosina arabinosido (ARA-C) y proporcionó información que permite al estudiante obtener la constante de Michaelis para la reacción enzimática. Se incluyen modelos sencillos para varios órganos mayores del cuerpo con información cinética y de transporte de masa. Se pide a los estudiantes predecir la concentración del fármaco en órganos individuales, tanto en un ratón como en un ser humano. Algunos problemas se pueden resolver sólo con balances de masa, mientras que otros requieren la integración de ecuaciones diferenciales ordinarias.

Robert Langer, del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), describió ciertos dispositivos desarrollados para la liberación controlada de fármacos. Un dispositivo descrito en detalle se basaba en un dosificador del hemisferio interno; al estudiante se le pide probar que la liberación del fármaco por difusión controlada a través de una matriz polimérica, sigue una cinética de orden cero. El estudiante necesita usar solamente balances de masa y resolver fácilmente ecuaciones diferenciales para predecir el grado de dosificación del fármaco. También se describieron sistemas más avanzados de dosificación.

Clark Colton, del MIT, presentó problemas relacionados con la transferencia de masa en membranas en el hígado artificial. Al estudiante se le pide que use la teoría básica de transporte de masa para predecir las concentraciones de salida en varias condiciones de operación, y analizar la plasmáforosis en un aparato de placas paralelas con una membrana permeable a las proteínas del plasma. Las partículas retenidas se acumulan en una capa limitante, y al estudiante se le solicita predecir la transferencia de masa bajo estas condiciones.

Administración y evaluación de riesgos

Peter Andow, de KBC Process Automation Ltd., presentó la primera conferencia sobre evaluación y administración de riesgos, en la cual hizo énfasis en la importancia de incluir el análisis de seguridad en el currículo de licenciatura (como es obligatorio en Inglaterra y en gran parte de Europa Occidental). Describió cómo se evalúan los riesgos y presentó la técnica de operabilidad

del riesgo (Hazop) para analizar la seguridad de las plantas químicas. Árboles de fallas se describen con ejemplos y al estudiante se le solicita que estime la confiabilidad de una zona pequeña de una planta química.

Louis Thibodeaux, de la Universidad del Estado de Louisiana, instó a los participantes de la Conferencia a ampliar su punto de vista sobre la ingeniería química, incluyendo el medio ambiente. Como ejemplo consideró la distribución de líquidos no acuosos en la superficie del suelo, en la cual la termodinámica de fases múltiples es importante; al estudiante se le pide que encuentre la distribución de benceno en el lixiviado de un basurero municipal. Otros problemas presentados incluyen la adsorción de contaminantes hidrofóbicos en la materia orgánica del suelo, capas viscosas en el fondo del mar, la adsorción de PCBs en el sedimento del lago Michigan y la partición sólido-agua de pesticidas orgánicos.

James Dunson Jr., de Du Pont, mostró cómo la ingeniería química básica puede utilizarse en dos problemas que implican fluidos reactivos en medios porosos. El primer ejemplo fue el control de la contaminación del aire que interfiere en la producción de dispositivos electrónicos en estado sólido. Al estudiante se le pide diseñar un absorbedor de charolas para un proceso de galvanoplastia usando mecánica de fluidos (arrastre) de acuerdo a la ecuación de Ergun y a la información de transferencia de masa obtenida de datos de la Armada de los Estados Unidos sobre el funcionamiento de máscaras de gas. El segundo problema incluye la inyección subterránea de rastros de cianuro; y al incluir la reacción de descomposición del cianuro, el estudiante debe desarrollar una política de bombeo para asegurar que el cianuro no se convierta en un problema de contaminación.

M. D. Boersma, de Du Pont, describió el proceso para hacer vidrio usado en la vitrificación de desechos nucleares, señalando las diferencias entre este proceso y el proceso normal para fabricar vidrio, de tal manera que el estudiante pueda ver cómo las especificaciones del producto afectan al proceso. Después se solicita al estudiante que por medio de balances de energía y estimaciones de transferencia de calor, determine los requerimientos de electricidad de un horno de vitrificación de desechos nucleares. Se sugieren ampliaciones de este problema para abarcar un análisis tridimensional de la transferencia de calor, el estudio de hornos de diferente forma y la selección de materiales.

Gary Blau, de Dow, habló de los métodos usados para evaluar el riesgo de exposición a sustancias químicas, se incluyen estudios con dosis altas en animales pequeños extrapolando para dosis pequeñas en humanos. El primer problema para el estudiante es predecir la exposición de operarios al pentaclorofenol en una planta para conservar madera. El segundo problema pide al estudiante comparar la evaluación de riesgo usando dos métodos: el standard y el modelo fármaco-cinético basado en la fisiología. Se requiere información sobre la cinética y la transfe-



rencia de masa en diversos órganos del cuerpo humano y se hacen predicciones respecto a las concentraciones de pentaclorofenol en diversos órganos del cuerpo al resolver las ecuaciones diferenciales ordinarias.

Walter Bauer, de Monsanto, describió un problema de confinamiento de peligro biológico que incluye desactivación térmica de DNA recombinado en un reactor tipo tanque con agitación mecánica. Se utilizan ecuaciones diferenciales ordinarias para el análisis de la transferencia de calor en un reactor en el cual son importantes tanto la temperatura máxima, como el tiempo.

Procesamiento de materiales avanzados

Durante la primera conferencia de este tema, Kenneth Walker, de los Laboratorios de AT&T Bell, expuso el proceso de manufactura de fibras ópticas. Utilizó principios de ingeniería química para describir el proceso y deducir que la termoforesis es el mecanismo para la depositación de vidrio. Se planteó el problema de la minimización del transporte de hidrógeno a una fibra óptica, ya que el hidrógeno aumenta mucho su resistencia óptica, está presente en las profundidades del mar y puede afectar a los cables sumergidos como consecuencia de la pérdida de gases de las cubiertas de polímeros.

Reg Davis, de Du Pont hizo énfasis en la importancia de la tecnología de partículas en la práctica de la ingeniería química, una área generalmente ignorada en la educación en los Estados Unidos. Él señaló que esta tecnología orientada al producto más que hacia su base científica, se estudia más extensamente en Europa y en Japón que en los Estados Unidos.

W. J. Hurley, de Du Pont, señaló los efectos de las diversas variables del proceso mientras describía la tecnología de partículas magnéticas para producir materiales de grabación. El ejemplo presentado implica la transferencia de calor en los reactores químicos anulares usados para fabricar materiales magnéticos para grabación.

Timothy Anderson, de la Universidad de Florida, hizo una comparación entre los circuitos integrados y las plantas de procesos químicos, estableció analogías entre flujo, transporte, cinética y las corrientes eléctricas y los efectos de campo correspondientes a cada una.

Richard Haber, de la Universidad Rutgers, experto en cerámica, dio un punto de vista de las etapas químicas necesarias en la formación de alúmina de compósitos y otros materiales, y describió problemas de procesamiento con posibles soluciones.

William Krantz, de la Universidad de Colorado, introdujo el modelo de la membrana ideal para analizar procesos de membrana en el salón de clases. Su interpretación gráfica, con líneas de operación y equilibrio, establece una relación sencilla con otros métodos de separación en el currículo de los estudiantes de licenciatura. También proporcionó información para que los estudiantes lleven a cabo una evaluación económica para los procesos de reciclado de varias membranas.

Materiales fotónicos y electrónicos

Richard Alkire, de la Universidad de Illinois, hizo énfasis en que los procesos electroquímicos siempre incluyen un potencial eléctrico, pero que éste puede ser un concepto nuevo para los ingenieros químicos. Alkire dio ejemplos de transporte de masa que incluyen la electrodeposición de películas de cobre sobre circuitos electrónicos y la aparición de picaduras en el aluminio por corrosión.

Timothy Anderson, de la Universidad de Florida, habló de la producción de semiconductores y presentó problemas sobre el crecimiento en el seno del cristal Czochralski, el equilibrio de la reacción en el sistema S-Cl-H, y en la estructura cristalina defectos del arsenuro de galio, los cuales podrían considerarse en el currículo de los cursos de ingeniería química.

Carol McConica, de la Universidad del Estado de Colorado, describió el uso de ingeniería de reactores y transferencia de masa para el diseño y optimización de reactores de depositación química en fase vapor (DVC). Ella expuso la reacción en las paredes porosas que conduce a un problema de variación en el tiempo del módulo de Thiele cuya solución muestra cómo varía la zona de reacción con el tiempo. Ella también presentó problemas relacionados con la distribución del flujo y la transferencia de masa entre placas separadas muy poco con un número de Peclet relativamente bajo, como sucede en reactores de una y varias obleas.

Dennis Hess, de la Universidad de California en Berkeley, describió la oxidación térmica del silicio a dióxido de silicio, incluyendo el transporte de masa del oxígeno fuera de la capa de dióxido de silicio, la difusión a través de la capa a la superficie de silicio, y la reacción en la superficie hasta formar dióxido de silicio. Se da información para que los estudiantes deduzcan parámetros en regímenes lineal y parabólico. Los resultados se utilizan para predecir la densidad de la película bajo condiciones de reacción específicas.

Mike Bohrer, de los Laboratorios de AT&T Bell, describió los procesos químicos utilizados para producir tetracloruro de silicio ultrapuro, requerido en la producción de las fibras ópticas de las que Ken Walker había hablado anteriormente. Dado que las impurezas deben estar presentes en el rango de partes por billón, es necesaria una combinación de transferencia de masa y de reacción química para el proceso de purificación. Se propor-

cionó información respecto a la absorción de cloro en el tetracloruro de silicio líquido en un reactor de burbuja. Los coeficientes de transferencia de masa deducidos de esta información son utilizados por el estudiante para diseñar un reactor tipo burbuja. El problema puede extenderse también a una operación no-isotérmica.

S. Babu, de la Universidad de Clarkson, habló de la difusión en los semiconductores de agentes impurificadores. Aunque la ecuación de difusión describe el proceso, su solución se complica debido a las condiciones iniciales y a que las de frontera cambian con el tiempo, así que la mayoría de las soluciones de los libros de texto no pueden aplicarse.

Louis Manzione, de los Laboratorios de AT&T Bell, habló del proceso de empaque para envolver con resina a los chips de circuitos integrados, lo que les da protección mecánica y estabilidad térmica. La optimización del proceso incluye el análisis de la distribución de flujo y transferencia de calor en un grupo de corridas para cada circuito integrado y la elección de las condiciones del proceso de manera que las fuerzas de arrastre viscoso y las de presión no rompan los frágiles conductores de alambre del circuito integrado. Se le pide al estudiante usar consideraciones de flujo de fluidos y transferencia de calor para analizar las partes de este proceso.

Procesos de separación

William Eykamp, de Sistemas de Membrana Koch, comparó tres tipos de procesos de separación que emplean membranas y que requieren presión externa: osmosis inversa, en la que la membrana es permeable al agua pero no a los electrolitos de microsolutos; ultrafiltración, en la cual la membrana también es permeable a sales disueltas; y microfiltración, en la que la membrana es permeable a macromoléculas solubles. Él hizo notar que la economía de los procesos de separaciones de membrana se gobiernan por el tamaño de los poros de la membrana y de los costos de bombeo de fluido. También describió diversas teorías para explicar que los resultados experimentales del flujo por unidad de área contra la caída de presión, que en gran medida determinan el costo de bombeo.

Edward Cussler, de la Universidad de Minnesota, expuso la naturaleza interdisciplinaria del programa de biotecnología en la universidad. Describió varios métodos de bioseparación basados en la eliminación de sustancias insolubles, aislamiento de productos, purificación y pulimento, así como las técnicas que pueden ser usadas en diferentes etapas de purificación, y cómo se puede incorporar esta información en los cursos existentes y en otros nuevos. Por ejemplo, sugirió que se debería incluir la descripción de los filtros rotatorios en los cursos de transferencia de masa, mientras que en cursos nuevos debe incluirse el estudio de cromatografía y centrifugación. Presentó problemas para el estudiante sobre la extracción de actinomicina D y de

hormonas, la recuperación por adsorción de amilasa y de tripsina, y cromatografía para triglicéridos.

C. Judson King, de la Universidad de California en Berkeley, hizo diversas consideraciones sobre el diseño en el procesamiento de alimentos, especialmente en el procesamiento de granos de café, e hizo énfasis en la relación entre la presión de vapor de los componentes y el sabor y aroma deseables del producto. Las características del producto final deseado (secado por aspersión, descafeinado, etcétera) se determinan de acuerdo a los componentes que se vayan a retener o a eliminar lo que determina las condiciones del proceso. Se pide a los estudiantes que seleccionen el proceso según las especificaciones del producto final.

Warren Seider, de la Universidad de Pennsylvania, demostró el uso de un programa para microcomputadora para la enseñanza de la extracción de fluidos en condiciones supercríticas. Con el uso de este programa el estudiante puede considerar un amplio rango de condiciones y alternativas de diseño para usar dióxido de carbono supercrítico para deshidratar etanol.

En la Conferencia también se desplegaron carteles con material didáctico sobre las nuevas tecnologías, cursos especializados que se están dando en algunas universidades y experimentos y demostraciones de laboratorio. Algunos de estos carteles aparecerán en las memorias de la Conferencia.

La Conferencia también incluyó dos ponencias que provocaron la reflexión y que no están resumidas aquí; deberán leerse en las memorias. Nos gustaría aclarar, sin embargo, que James Wei del MIT, Presidente del American Institute of Chemical Engineers, abrió la Conferencia con unas palabras sobre el National Research Council Report, "Las fronteras de la ingeniería química: necesidades y oportunidades de investigación", comúnmente conocido como el Reporte Amundson, y los paradigmas útiles para definir el campo de la ingeniería química y predecir su futuro. El primer paradigma se refiere a las operaciones unitarias introducidas por Walker, Lewis y McAdams en 1923, y el segundo a los fenómenos de transporte como los presentaron Bird, Stewart y Lightfoot en 1960. El tercer paradigma todavía está por escribirse. En la plática durante el banquete, Alan Michaels, de la Universidad del Estado de Carolina del Norte, habló sobre el tema de la necesidad de intervenir en un medio ambiente técnico y sobre la investigación interdisciplinaria en la universidad. Él hizo notar que en su experiencia en pequeñas compañías, el énfasis estaba en el esfuerzo creativo del equipo en un medio ambiente de trabajo de alta tensión, con metas de aplicación práctica y sobrevivencia del grupo, y no metas de realización independiente como en la academia.

Esperamos que esta Conferencia y la publicación de sus memorias serán largamente recordadas como el primer paso organizado de un proceso continuo para incluir materiales didácticos sobre las nuevas tecnologías en el currículo de ingeniería química. ■