

La biotecnología y la biomedicina*

(SEGUNDA DE DOS PARTES)

La competencia internacional

¿Quién estará a la vanguardia de la comercialización de la "nueva" biología? La respuesta todavía no está clara. Los principales competidores tecnológicos de los Estados Unidos, los europeos y los japoneses, están realizando decididos esfuerzos para comercializar los resultados de la investigación biológica básica. Alemania Occidental, Japón y el Reino Unido tienen cada uno tres grandes institutos, con apoyo gubernamental, dedicados a la biotecnología. Estados Unidos sólo tiene un centro de magnitud comparable (el Centro de Procesos Biotecnológicos del MIT). No es de sorprender que nuestros competidores tomen posiciones comerciales mediante la práctica eficiente y previsoras de la ingeniería bioquímica y biomédica. Algunos ejemplos en cuanto a sus logros recientes muestran su firme propósito en este sentido.

La tecnología básica para la separación de biomoléculas por membranas se inventó en los Estados Unidos, pero los alemanes occidentales y los japoneses están a la vanguardia en su aplicación para separar enzimas y aminoácidos de mezclas complejas. El apoyo del gobierno japonés sólo para la investigación y desarrollo de la separación por membranas, ascendió a 21 millones de dólares en 1983. Esto es varias veces lo gastado en el mismo rubro por el gobierno norteamericano. La trascendencia del bien financiado esfuerzo japonés se puede ver en el número creciente de dializadores de sangre (riñones artificiales) que están apareciendo en los hospitales de los Estados Unidos.

La tecnología para grandes fermentadores continuos (400 mil galones), se desarrolló y se está poniendo

en práctica en el Reino Unido. Este desarrollo llevó a la ingeniería bioquímica a límites todavía por explorar en los Estados Unidos.

Aunque el uso de la fermentación para producir etanol sea una tecnología antigua, se han ideado procesos continuos más eficientes que emplean células inmovilizadas, y el Japón ha establecido la primera planta a escala de demostración.

Según el Departamento de Evaluación Tecnológica (Office of Technology Assessment, OTA), Europa Occidental y Japón han mantenido históricamente un programa amplio y estable de apoyos económicos para la ingeniería bioquímica. En los Estados Unidos la situación es diferente. La ayuda que existe para los ingenieros químicos en otros países, y su creciente interés por explotar los descubrimientos de la "nueva" biología, se muestra en los amplios fondos y apoyos prestados por el gobierno. Es claro que países como Alemania Occidental y Japón están colocando los cimientos de la investigación y de la capacitación de la ingeniería como parte de su estrategia total para la intensa competencia internacional en las áreas de biotecnología y medicina. La potencial recompensa económica al éxito es enorme. Asumir la vanguardia en estos mercados será sumamente importante en la competencia internacional, y aquellos países que posean la infraestructura de investigación necesaria, lograrán los beneficios principales en el mercado mundial de los bioproductos.

Las fronteras intelectuales

Las fronteras intelectuales para los ingenieros químicos

* Texto tomado del capítulo III de Amundson, N.R. *et al*, *Frontiers in Chemical Engineering. Research needs and opportunities*, National Academy Press, 1988. La responsabilidad de este capítulo recae en el Comité de Ingeniería Bioquímica y Biomédica, presidido por A. E. Humphrey, de la Universidad de Lehigh. Su traducción e inclusión en la revista se basa en el amplio, reciente e importante desarrollo de estas disciplinas, dentro del campo de acción de los ingenieros químicos.

Educación Química agradece la traducción de Anne Albarelli y la corrección idiomática de Águeda Saavedra. Colaboró en la traducción técnica Irene Artigas.

en biotecnología y biomedicina se pueden describir mediante un continuo que fluctúa entre la microescala, la mesoescala y la macroescala. En cualquier extremo de estos niveles, se encuentran temas de investigación altamente interdisciplinarios, que requerirán de instrumentos de diseño y análisis que los ingenieros químicos usan actualmente en otros contextos. En la mesoescala, los retos importantes del bioprocesamiento requerirán de la experiencia de la ingeniería química en los campos de la ingeniería de reacciones, del diseño y control de procesos, y en el de separaciones. Dichos retos se analizan detalladamente a continuación.

Modelos para interacciones biológicas fundamentales

La célula viva microbiana, animal o vegetal, se puede considerar como una planta química microscópica que puede extraer materias primas de su medio ambiente y usarlas para reproducirse; asimismo, puede sintetizar múltiples productos valiosos para ser almacenados en la célula o excretados. Esta planta química microscópica contiene su propia planta de poder, que funciona con una eficiencia extraordinariamente alta. También contiene un complejo sistema de autocontrol, que mantiene los balances apropiados de flujos de masa y energía en las conexiones de su red interna de reacciones.

Las membranas celulares no son únicamente fronteras pasivas de los contenidos de la célula, sino sistemas biológicos sumamente organizados, dinámicos y estructuralmente complejos, que regulan la transferencia de productos químicos específicos a través de la pared celular.

Un componente importante de las membranas celulares es una clase de moléculas —los fosfolípidos— que espontáneamente forman películas de doble capa con geometrías diversas. Muchas de las propiedades físicas importantes de las membranas celulares, tales como la difusión bidimensional y la diferenciación entre las partes interiores y exteriores de una esfera o un tubo, se pueden estudiar con estas estructuras formadas espontáneamente.

Si pudiéramos desarrollar modelos cuantitativos exactos que simularan la manera como las células responden a los diversos cambios ambientales, podríamos utilizar mejor las capacidades de síntesis química de las células. Se están tomando medidas para alcanzar esta meta. Se han desarrollado modelos de la bacteria *Escherichia coli*, una bacteria común del intestino, a partir de mecanismos de procesos subcelulares, descubiertos o postulados por los biólogos moleculares. Estos modelos han sido desarrollados a tal punto que se pueden usar experimentalmente para distinguir diferentes mecanismos postulados para el control de procesos subcelulares.

Algunas de las posibles aplicaciones más prometedoras se darán en células animales o vegetales. Sin embargo, todavía no se cuenta con modelos para estos organismos, que tienen mayor complejidad interna y

requerimientos ambientales más rigurosos que las células simples. Probablemente será necesario incorporar, en los modelos de células complejas, la estructura de subunidades funcionales de la célula (organelos), además de la estructura química que se usa como modelo de células bacterianas. Las reacciones celulares están sujetas a las limitaciones impuestas por las leyes de la termodinámica, por la difusión y por la cinética de reacción. Los ingenieros químicos están familiarizados con las técnicas para el diseño de modelos matemáticos que involucran estos parámetros, y deberán ser capaces de contribuir, de manera importante, en el desarrollo de modelos celulares. El desarrollo de modelos confiables depende de la adquisición de bases de datos exactos sobre enzimas, proteínas biológicamente importantes y sistemas celulares. Los datos deben incluir las propiedades físicas, las propiedades de transporte, las propiedades químicas y la información sobre la velocidad de reacción.

Superficies e interfases biológicas

Muchas reacciones y procesos biológicos ocurren en las fronteras de una fase y, por lo tanto, son controladas por interacciones de superficie. Los ejemplos incluyen procesos tan altamente eficientes como el transporte de iones a través de membranas, las interacciones anticuerpo-antígeno, la síntesis de proteínas celulares y la transmisión de impulsos nerviosos. Se puede apoyar el progreso en la adquisición de rendimientos similares en los procesos de ingeniería enzimática y de bioseparaciones, y la transmisión de información se impulsará mediante la obtención de conocimientos más profundos acerca de los procesos bioquímicos en interfases. Con estos conocimientos, se podrían desarrollar anticuerpos sintéticos para antígenos humanos y animales, o membranas sintéticas que puedan servir como glóbulos rojos artificiales o barreras de transporte.

Las interacciones de superficie juegan un papel importante para que ciertas células animales tengan la capacidad de producir los bioproductos deseados. Por ejemplo, para mejorar el diseño de biorreactores de reproducción de células animales, se necesitará comprender la dinámica de las interacciones de superficie celular en estas células dependientes del anclaje (*anchorage dependent*) —células que funcionan bien solamente cuando están sujetas a una superficie.

Las interacciones en superficies e interfases también juegan un papel esencial en el diseño y funcionamiento de injertos clínicos y aparatos biomédicos. Salvo algunos casos excepcionales recientes, los injertos no se sujetan bien a los tejidos, y la movilidad resultante de la interfase tejido-implante provoca inflamación crónica. El resultado puede ser un agrupamiento de plaquetas en el lugar mismo del implante, lo que provoca un coágulo o la formación de una cápsula fibrosa, o cicatriz, alrededor del mismo.

Son numerosas las preguntas fundamentales acerca de los cambios biológicos en la interfase tejido-implante

que constituyen un reto para que los ingenieros químicos diseñen injertos y aparatos médicos. Entre esas preguntas están las siguientes: ¿Cómo interactúan las células con las superficies de materiales bien caracterizados? ¿Qué sitios receptores en las membranas celulares interactúan con qué grupos funcionales en las superficies de los materiales biomédicos? ¿Cuál es el efecto de otros factores morfológicos de la superficie, o de las propiedades mecánicas del material? ¿Cómo cambia la actividad metabólica de la célula después de una reacción con una interfase material? ¿Qué enzimas o productos químicos nuevos aparecen después de esta reacción? ¿Cómo conduce la información obtenida en esta área hacia mejores materiales, o al desarrollo de nuevos métodos para sujetar los materiales biomédicos a los tejidos? ¿Cómo pueden contribuir los ingenieros químicos a buscar mejores métodos a fin de verificar, sin interferencia, los materiales injertados?

El bioprocesamiento

En el bioprocesamiento existen tres fronteras intelectuales importantes para los ingenieros químicos: el diseño de biorreactores para el cultivo de células vegetales y animales; el desarrollo de sistemas de control, junto con los biosensores e instrumentos analíticos necesarios; y el desarrollo de procesos para separar y purificar productos. En cada una de estas tres áreas de investigación, la necesidad de relacionar la microescala con la mesoescala es un componente esencial.

Biorreactores para los procesos de fabricación

En muchos de los trabajos pioneros sobre la aplicación de la tecnología de ADN recombinante para la producción de sustancias biológicamente activas, se han usado especies de células microbianas tales como bacterias, levaduras y hongos. La manipulación genética de estos microorganismos es bastante fácil. Además, rara vez se encuentran bajo condiciones adversas. Desafortunadamente, las proteínas animales o vegetales producidas por la clonación en células microbianas carecen a menudo de la estructura tridimensional crítica que aparece cuando las células de plantas y animales producen las mismas proteínas. Por esta razón, es posible que estas proteínas no sean biológicamente activas, aunque tengan la secuencia correcta de aminoácidos. Un área importante de la biotecnología del futuro se encuentra en el uso de células vegetales y animales, en lugar de células microbianas. El uso, en gran escala, de células vegetales y animales para el cultivo de tejidos, da lugar a problemas importantes en el diseño y funcionamiento de biorreactores.

Un problema que ya se mencionó es que ciertas células animales son dependientes del anclaje. Además, las células vegetales y animales se quiebran fácilmente con las deformaciones mecánicas. Se tienen que diseñar biorreactores para el manejo de estas células, de tal manera que el contenido del reactor pueda mezclarse sin

romperlas. Un problema similar existe en el diseño de sistemas para transferir células de un recipiente a otro.

Hay una tendencia de las células vegetales a reunirse, por lo que se forman grandes agregados celulares que provocan problemas tanto para mantener el abastecimiento de nutrientes en todas las células, como para eliminar los desechos. El desarrollo de biorreactores para las células vegetales requerirá de una comprensión de las limitaciones de la transferencia de masa en tales agregados.

Algunos sistemas de biorreactores deben protegerse completamente de la contaminación microbiana, lo que significa que no puede permitirse que ninguna bacteria extraña o partícula viral penetre al sistema. Hay que desarrollar sistemas confiables y económicos para lograr este nivel de prevención de contaminantes. Además, existe la necesidad de poder detectar la contaminación por unos cuantos microorganismos en un medio de cien kilolitros. Todavía no se puede lograr este grado de detección, pero su investigación podría mejorar enormemente los crudos métodos de detección usados actualmente.

La mayoría de los bioprocesos industriales están siendo operados en reactores discontinuos o intermitentes (*batch*). El procesamiento discontinuo es el método elegido para la producción en pequeña escala, y ofrece la ventaja de que el equipo puede ser usado para la producción intermitente de más de un producto. Una posibilidad interesante en el futuro es que los productos químicos y bioquímicos sean producidos por la biotecnología sobre una base continua y a gran escala. Frecuentemente, el procesamiento continuo ofrece ventajas económicas y uniformidad en la calidad del producto. Sin embargo, los problemas que involucra la conversión de la producción intermitente al procesamiento biológico continuo no son triviales. El procesamiento continuo de sistemas biológicos impone exigencias rigurosas en el diseño del equipo, la instrumentación y el funcionamiento, para mantener en condiciones asépticas el contenido biológico. Un ejemplo de tales dificultades es que, aunque los procesos de la fermentación de materiales naturales para producir cerveza sean anteriores a la historia escrita, la cerveza todavía se elabora y se añeja en reactores discontinuos. Los intentos de usar un proceso continuo para fabricar un producto tan conocido como la cerveza no han producido una bebida con un sabor aceptable.

Verificación y control del proceso

Para el control y la optimación de las operaciones de bioprocesamiento se necesita un conocimiento continuo y detallado de las condiciones del proceso. Debido a problemas de confinamiento y contaminación, muchas veces se tiene que obtener este conocimiento sin el muestreo de la corriente de proceso. Actualmente, las condiciones de temperatura, presión y acidez (pH) pueden ser medidas rápidamente y con exactitud. Es más difícil

verificar las concentraciones de las especies químicas en el medio de reacción, igual que la densidad de la célula y las concentraciones intracelulares de cientos de compuestos.

Una meta prioritaria en la comercialización de la biotecnología es el desarrollo de sensores de medición que no interfieran, así como de instrumentos rápidos y exactos.

Algunos de estos instrumentos se basarán en los métodos analíticos usados actualmente en la catálisis y en otras ciencias de superficies, como son por ejemplo:

- La espectroscopía infrarroja de transformadas de Fourier;
- Fluoroespectrometría;
- Espectrometría de masas;
- Espectrometría de resonancia magnética nuclear (NMR), y
- Combinaciones de algunos de los métodos mencionados con la cromatografía (técnicas acopladas).

Los ingenieros químicos aplicarán estos métodos para verificar y controlar sistemas de reacción y recuperación.

Separación de bioproductos

Los biorreactores de cultivo de células producen una mezcla diluida de células en un medio acuoso. La recuperación de las proteínas producto de estas células puede requerir la ruptura de las mismas. Esto crea una multitud de problemas; por ejemplo, se tienen que eliminar las paredes de las células y los organelos; se deben concentrar las proteínas de una solución altamente diluida, compuesta principalmente por agua y por otras moléculas pequeñas; existe la necesidad de separar las proteínas deseadas de otras macromoléculas con propiedades similares. Para las proteínas biológicamente activas, las separaciones no sólo tienen que ser específicas para las proteínas "blanco", sino que además deben ser lo suficientemente suaves para evitar la desnaturalización y pérdida de la actividad biológica; asimismo, tienen que ser adecuadas para operar a gran escala. La solución de estos problemas requiere de una investigación genérica de las separaciones altamente selectivas, igual que de investigaciones de los problemas para concentrar materiales a partir de soluciones muy diluidas.

Éstas y otras oportunidades de investigación genérica se han descrito con detalle en un informe reciente del Consejo Nacional de Investigación (National Research Council). El seguimiento de estas oportunidades resultará en un mejor entendimiento de los procesos de separación actualmente usados para la purificación de proteínas en gran escala (por ejemplo: cromatografía de precipitación y de proceso). Es posible que también resulte en separaciones novedosas que involucren otros aspectos de la tecnología como son:

- Cromatografía;
- Separación por membranas;
- Separación (fraccionamiento) por campos eléctricos y gravitatorios;
- Inmunoadsorción;
- Extracción con fluidos supercríticos;
- Extracción en dos fases mediante una solución acuosa, y
- Separación mediante el uso de microemulsiones.

El desarrollo de tales separaciones nuevas es muy importante para el desarrollo de la biotecnología industrial.

Otro enfoque para los problemas de separación se encuentra en el desarrollo de organismos modificados, que produzcan las proteínas blanco en rendimientos y concentraciones altas, lo que reducirá el tiempo y costo de la separación de proteínas de grandes cantidades de agua. Ésta es otra área en donde sería valioso el compromiso de los ingenieros químicos en las etapas iniciales del diseño de organismos genéticamente modificados. Con su ingenio respecto a los requerimientos del procesamiento de sustancias biológicamente sintetizadas bajo condiciones de flujo limitado, los ingenieros químicos podrían ser miembros valiosos de un equipo interdisciplinario de biólogos moleculares y bioquímicos, que busquen alterar la información genética de las células.

Análisis de la ingeniería de sistemas biológicos complejos

Con un mayor conocimiento de los procesos fisiológicos y patológicos del cuerpo, se apoyará el desarrollo de nuevos procedimientos terapéuticos. Los ingenieros químicos podrán contribuir en el área de la aplicación del análisis de la ingeniería a los sistemas corporales. Un ejemplo es el estudio del transporte de sustancias a través de membranas. Se tiene un conocimiento considerable del transporte de moléculas pequeñas a través de membranas vivas, el cual debe extenderse al estudio de moléculas más grandes. Una comprensión mayor de los agentes biológicamente activos sería particularmente importante para el diagnóstico y la terapéutica.

Los procesos bioquímicos en los humanos pueden ser medidos actualmente mediante técnicas tales como la tomografía de emisiones positrónicas, las imágenes por resonancia magnética y la tomografía de rayos X asistida con computadora; el nivel de las mediciones puede ser aumentado por los métodos de la sustracción digital. Los ingenieros químicos pueden apoyar la elucidación de los datos obtenidos por tales técnicas mediante el desarrollo de modelos cuantitativos que incorporen termodinámica, fenómenos de transporte, mecánica de fluidos y principios de la ingeniería de reacción química. Estos avances llevarán a mejores procedimientos terapéuticos.

El crecimiento normal de tejidos y órganos está bajo un asombroso control natural. Cuando éste se ve afecta-

do por alteraciones genéticas (mutaciones), los resultados pueden ser patológicos, como los defectos de nacimiento o el cáncer. Se necesita una mejor comprensión básica de este proceso de control. Los avances teóricos y sistemáticos hechos por los ingenieros químicos en el control de procesos quizá se apliquen al estudio de este problema.

En tanto que se puede predecir con algo de confiabilidad el desempeño mecánico de materiales artificiales en el cuerpo humano, el prever su actividad biológica es difícil. Ya se ha mencionado el problema de las interacciones en las superficies. Las fronteras de investigación también incluyen el desarrollo de técnicas para simular *in vitro* procesos *in vivo* y extender la potencialidad y la aplicabilidad de tales simulaciones para predecir mejor la actividad de materiales y aparatos biomédicos en el paciente. La información fundamental sobre la correlación entre las respuestas *in vivo* e *in vitro* es limitada. Tal vez los ingenieros químicos puedan hacer contribuciones al problema de la verificación "no invasiva" de materiales injertados.

Implicaciones de las fronteras de investigación

Los esfuerzos más exitosos relacionados con los problemas descritos procederán de un nuevo perfil del ingeniero químico, que conozca el lenguaje y conceptos de la biología y la medicina modernas. Actualmente, pocos ingenieros químicos tienen los conocimientos suficientes de los principios de la biología molecular moderna, de la microbiología, de la genética y de la bioquímica para permitir su colaboración efectiva con los biocientíficos. A la inversa, pocos biocientíficos están lo suficientemente conscientes de los principios de la ingeniería y de los problemas prácticos asociados con el procesamiento a gran escala de bioproductos, o con el desarrollo de aparatos biológicos artificiales. Todas las disciplinas participantes deben reconocer la importancia de la síntesis innovadora de nuevos conceptos que unan la teoría y los hechos de la biotecnología con los principios de la ingeniería, o que combinen una idea de la ingeniería con una especulación biológica. Tal síntesis innovadora probablemente resulte solamente en un ambiente donde se puedan identificar las necesidades de la investigación y los problemas no resueltos, que tiendan un puente sobre las fronteras disciplinarias y obliguen a los representantes de todas las disciplinas a trabajar juntos para encontrar las mejores soluciones. Un aprovechamiento inmediato y efectivo de la "nueva" biología depende del mejoramiento de esta interfase disciplinaria; y es uno de los problemas más críticos que enfrenta actualmente la bioingeniería.

La necesidad de desarrollar una fusión nueva con la biología moderna tiene implicaciones importantes para la educación y la investigación de la ingeniería química:

— El desarrollo de programas fructíferos de educación e investigación en la ingeniería bioquímica y biomé-

dica no puede tener lugar si se le aísla de la biotecnología; igualmente, son esenciales los programas académicos fuertes y complementarios en las ciencias biológicas o médicas. Las instituciones que no tienen actividades sólidas de investigación en biotecnología, no deberán ser alentadas a desarrollar programas en la ingeniería bioquímica o biomédica.

- Se necesitan modificar los currículos en los niveles de licenciatura y posgrado, para que los alumnos adquieran los conocimientos suficientes de las ciencias biológicas, a fin de poder aplicar los métodos de análisis y de diseño de la ingeniería a la resolución de problemas que se originan en las ciencias biológicas. En el posgrado, los cursos especializados en biología molecular, bioquímica, y fisiología celular y animal mamífera deben formar parte de los requisitos para los ingenieros químicos con especialización en la bioingeniería.
- Se deben estructurar tales cursos específicamente para los ingenieros, incluir prácticas de laboratorio significativas, y proporcionar los requisitos necesarios para que el estudiante de ingeniería pueda tomar cursos avanzados de biología y ciencias médicas, si así lo desea.
- Los estudiantes de doctorado deben estar preparados para el ambiente interdisciplinario en el cual seguramente desarrollarán sus carreras como ingenieros bioquímicos o biomédicos. La mejor manera para lograrlo es exponerlos a la investigación interdisciplinaria cuando son estudiantes de posgrado. Para facilitararlo, se debe crear un apoyo de investigación amplio y estable, enfocado hacia la investigación interdisciplinaria. Algo que resultaría particularmente valioso es el apoyo enfocado a colaboraciones de investigación de grupos medianos, que reúnan a dos o tres investigadores principales, cuyos antecedentes y experiencia crucen las fronteras de la ingeniería química y las ciencias biológicas, incluyendo la medicina. En tanto que los grandes centros de investigación pueden favorecer ambientes de investigación interdisciplinaria, un mayor número de colaboraciones en grupos medianos pueden, tal vez, fomentar un crecimiento más rápido de las capacidades estadounidenses en las áreas críticas de la bioingeniería.
- Para montar un programa de educación significativo en la ingeniería bioquímica y biomédica se necesita un académico con experiencia, no tanto en los aspectos de la ingeniería como en los de la biología de frontera descritos en este capítulo. Un paso que quizá se pueda alentar es la contratación de profesores, en los departamentos de ingeniería química, cuya capacitación inicialmente sea en las ciencias médicas o biológicas. Probablemente se necesite la presencia de un departamento de biología fuerte en investigación o de una escuela de medicina cercana, para proporcionar un ambiente que atraiga y reten-

ga a los mejores profesores. No obstante, hay muchos obstáculos prácticos por vencer si se desea tener éxito en tales nombramientos. Algunos departamentos de bioingeniería ya han hecho nombramientos conjuntos con biólogos y médicos. Cuando se puedan evitar o resolver los problemas de organización inherentes en tales arreglos, se deben favorecer dichos nombramientos.

Ciertos factores de otra índole serán importantes para sostener un esfuerzo de investigación vital en la ingeniería bioquímica y biomédica. Éstos incluyen:

Instrumentación y medios

La instrumentación y los medios adecuados para la educación y la investigación de la bioingeniería pueden ser muy costosos. Por ejemplo, el equipamiento de un centro avanzado de cultivo de tejidos para estudios de ingeniería, cuesta alrededor de 500 mil dólares. Otro equipo costoso, pero necesario, incluye ultracentrífugas, microscopios electrónicos, espectrómetros de masas, espectrómetros NMR, contadores de centelleo e instrumentos especializados para estudiar superficies. Una parte de este equipo tiene que ser especialmente modificado y dedicado al uso de un grupo particular. Se pueden compartir otros instrumentos entre un equipo de ingenieros químicos, biólogos y médicos investigadores, cuando sea posible. Los ingenieros químicos deben hacer uso de los medios existentes en los departamentos biológicos y médicos, sobre todo en el caso de los medios relacionados con el ámbito animal.

Centros nacionales de investigación

Tal vez se logre reunir conjuntos especiales y altamente avanzados de equipo analítico y de cómputo, así como la experiencia necesaria, dentro de centros de investigación nacionales, de los cuales podrían disponer, por periodos limitados, grupos médicos, gubernamentales e industriales.

Algunas áreas potenciales de especialización para tales centros incluyen el diseño y control de biorreactores, la medición y control de datos farmacocinéticos, la medición real o simulada de bioflujos en sistemas vivos y reactores, y el estudio de la cinética de reacciones biológicas y procesos relacionados.

Acoplamiento efectivo a la industria

Para lograr una educación e investigación exitosas en ingeniería bioquímica y biomédica, es esencial establecer vínculos efectivos entre las universidades. En esta área creciente de la tecnología, una necesidad particular es el

contacto efectivo entre los departamentos de ingeniería química y las empresas de capital más pequeñas que se especializan en la biotecnología o en los productos biomédicos. Se deben alentar programas de vinculación, así como otros mecanismos que promuevan interacciones entre investigadores activos, y oportunidades para que los alumnos puedan pasar un buen tiempo en laboratorios industriales.

Mejor comunicación entre las sociedades profesionales

El campo de la ingeniería bioquímica y biomédica está en peligro de fragmentarse entre una diversidad de sociedades profesionales, algunas de las cuales tienen un enfoque muy limitado. Actualmente funcionan infinidad de estas organizaciones. La *AICHE* podría jugar un papel valioso para mejorar esta situación, al promover mejor comunicación y cooperación entre las sociedades e investigadores de otras disciplinas.

Los ingenieros bioquímicos y biomédicos del futuro van a tener gran demanda por parte de la industria, de las universidades y de agencias federales y estatales.

Existe ya una fuerte demanda de profesores de ingeniería bioquímica y biomédica por parte de las universidades; en tanto, la demanda reciente de la industria no ha sido tan intensa, pero tenderá a incrementarse fuertemente en cuanto se definan mejor los productos y se aproximen a la producción comercial. Las agencias federales y estatales que serán responsables de regular la introducción de nuevos bioproductos en la sociedad, se encuentran lamentablemente escasas de personal en lo que corresponde a biólogos experimentados. Estas agencias (por ejemplo: *EPA*, *USDA* y *FDA* —organizaciones estadounidenses para el medio ambiente, los medicamentos y los alimentos), deben apoyar la investigación de la ingeniería química para obtener los datos, modelos y profundizaciones necesarias, a fin de evaluar y atender los riesgos posibles y su control.

Es característico que los mercados de trabajo del personal científico y de la ingeniería en los Estados Unidos resientan paradójicamente la escasez severa y los excesos sobrecompensados. No obstante, ahora es el momento para que el gobierno federal y las universidades construyan una base de investigación y de educación en las áreas académicas que puedan responder flexible y eficazmente a las demandas de personal que inevitablemente vendrán. Ahora es el momento para preparar a un grupo de ingenieros químicos que puedan interactuar tan fácil y exitosamente con los biocientíficos como lo hacen actualmente con los químicos y con los físicos. 