

# INGENIERIA QUÍMICA: ESCENARIO FUTURO Y DOS NUEVOS PARADIGMAS

Heberto Tapias García\*

La incorporación creciente y acelerada de nuevos conocimientos en todas las actividades humanas hace más incierto y aparentemente caótico el futuro. “La constatación de que la mayor parte de las realidades que conocemos hoy, creadas por el hombre, casi seguramente no sobrevivirán en el futuro y muchas que lo serán no existen hoy o apenas se insinúan”<sup>1</sup>, evidencia la necesidad de disponer de metodologías y herramientas que permitan construir imágenes anticipadas del futuro, para prever problemas y oportunidades con los cuales se enfrentarán las acciones de los hombres. Conjeturar sobre los devenires posibles o probables en todos los ámbitos de las actividades humanas con la intención de advertencia anticipada, es en síntesis el objetivo último de la prospectiva<sup>2</sup>.

Tener una imagen aproximada sobre el rumbo y el estado futuro de la ingeniería química en el mundo no sólo resulta de capital importancia para la planeación del desarrollo y la supervivencia de las industrias de procesos químicos, sino que también es un punto de referencia obligado para el diseño de los planes de estudio en esta profesión. Para los países en desarrollo es ilustrativo conocer el estado inmediato y a corto plazo de la ingeniería química en los países desarro-

llados, pues la evolución de la nuestra está autocontenida en la corriente vertiginosa de cambios que se vienen experimentando en la industria de procesos químicos como industria globalizada -caracterizada por un mercado mundial, una base productiva mundial y un entorno tecnológico mundial<sup>3</sup>-. Nuestra imagen regional de futuro cercano es sólo una imagen ligeramente adaptada del presente de las industrias de los países líderes, no porque el subdesarrollo sea una etapa en el camino del desarrollo sino por el grado de dependencia tecnológica y económica que derivamos de ellos.

Para hablar de futuro es necesario hacer retrospectiva y respondernos preguntas orientadoras como, cuál ha sido la historia de la ingeniería química?, para saber sobre: cuáles son sus orígenes?, cuáles sus paradigmas nucleadores?, cuáles sus problemas no resueltos?, y cuáles los grandes retos que consolidaron su existencia?. Así mismo en una mirada exploratoria de porvenir, identificar tendencias y los retos y oportunidades que se avienen.

Si bien, el presente ensayo no es el resultado de un estudio riguroso en el que se hayan utilizado técnicas de previsión tecnológica y mucho menos

---

\* Profesor Ing. Química Universidad de Antioquia

una metodología integradora de indagación de futuro como el método de los escenarios, si recoge en un apretado esfuerzo sintetizador testimonios y conjeturas de otros autores, sobre los cambios que se vienen observando en la industria de procesos químicos e impactos que se esperan de algunos desarrollos tecnológicos que se están gestando en esta industria e industrias relacionadas. En el marco de este ejercicio prospectivo también se sugieren las bases para dos nuevos paradigmas que impulsarán el desarrollo y una nueva estructura del conocimiento de la ingeniería química en el futuro.

## EVOLUCIÓN DE LA INDUSTRIA DE PROCESOS QUÍMICOS

El desarrollo de la ingeniería química ha corrido paralelo con la evolución de la industria de procesos químicos; al fin y al cabo este ha sido el ámbito, hasta ahora, de los problemas que aborda esta disciplina.

Los rudimentos de la ingeniería química aparecen con el nacimiento de la industria química y la primera revolución industrial que se llevó a cabo a finales del siglo XVIII en la Gran Bretaña. La industria química fue una componente importante de esa revolución industrial, que ha sido generalmente descrita como la mecanización de los sistemas de producción orientados a la manufactura de mercancías de uso final. Esa revolución industrial habría sido incompleta sin los químicos efectivos y baratos para el blanqueo, teñido y limpieza de fibras requeridas y tejidos elaborados por la industria textil.<sup>4</sup> Los químicos empíricos y empresarios británicos empezaron la manufactura a gran escala de ácido sulfúrico, soda, carbonato de sodio, cloro blanqueador y algunos colorantes sintéticos, los cuales constituyeron el corazón de la industria química hasta finales del siglo XIX.<sup>5</sup>

A finales del siglo pasado la estructura de la industria química sufrió modificaciones significativas a raíz de las innovaciones introduci-

das en la producción de álcali y cloro y, particularmente, por los nuevos desarrollos en su sector más dinámico: los colorantes. El campo de los colorantes experimentó rápidamente cambios tecnológicos gracias a la aplicación de la teoría química, convirtiéndose este sector en el embrión de la industria química moderna. La industria de los colorantes alemana enfrentó durante la primera guerra mundial la necesidad de manufacturar explosivos, gases venenosos, medicamentos y hasta caucho sintético<sup>6</sup>. Ella fue la gran innovadora, no sólo en su campo sino también en la química inorgánica; BASF, por ejemplo, fue la pionera en el uso del proceso de contacto para la producción de ácido sulfúrico y la que desarrolló el proceso Haber-Bosch para la síntesis de amoníaco por combinación directa de nitrógeno e hidrógeno - el primer proceso que usó gases a altas temperaturas y presiones y que requirió plantas especializadas y capital intensivo.<sup>7</sup>

Las revoluciones industriales desencadenadas alrededor del motor de combustión interna -tercera revolución industrial-, y de la línea de ensamble y la petroquímica para la producción masiva de combustibles y materiales sintéticos energo-intensivos, plásticos y fibras, -cuarta revolución industrial-<sup>8</sup>, generaron retos y oportunidades para el desarrollo de la ingeniería química que conocemos hoy.

Fue la ESSO en Estados Unidos, 1919, la que se enfrentó inicialmente a la falta de preparación y conocimientos para responder a la explosiva demanda de combustibles para automóviles desatada después de la primera guerra mundial, a raíz de la innovación de Henry Ford para la producción masiva y en línea de automóviles. El reto fundamental para las industrias petroleras consistía en cómo producir grandes cantidades de gasolina con una tecnología que superara el desempeño de las plantas primitivas de cracking térmico.<sup>9</sup> Sólo fue hasta 1945 cuando se introdujo comercialmente el cracking catalítico en lecho fluidizado, el cambio más

importante en la industria de refinación del petróleo. El éxito de este desarrollo estimuló la investigación en la tecnología de lecho fluidizado en otras reacciones, y hoy es ampliamente utilizada en la producción de otros químicos como el acrilonitrilo, en procesos metalúrgicos y en sistemas de combustión para calderas e incineradores.<sup>10</sup>

La segunda innovación en importancia en la industria de refinación del petróleo fue la reforma catalítica para convertir naftenos de octanaje muy bajo y parafinas en aromáticos de alto octanaje, como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, materiales sustitutos del tetraetilo de plomo -cuya eliminación era obligatoria- usado para el mejoramiento del octanaje de la gasolina.<sup>11</sup>

Con una interrupción en su crecimiento durante la depresión económica después de la primera guerra mundial, la industria de procesos químicos se desarrolló para hacer autosuficientes a sus países en los productos tradicionales en el mercado, y vivió en la década del treinta el florecimiento de un nuevo subsector: la industria de los polímeros sintéticos.

El origen de la industria de los polímeros sintéticos se remonta al siglo diecinueve con los intentos de explotar el caucho natural y la celulosa. Particularmente los derivados de la celulosa permitieron el desarrollo de la primera fibra artificial: el rayón. Mientras las industrias del caucho y de la celulosa crecían, los materiales poliméricos no eran más que una curiosidad de los químicos por sus comportamientos impredecibles. Eran sustancias prácticamente desconocidas desde el punto de vista teórico. Es a partir de los primeros intentos de construir un cuerpo teórico coherente sobre las macromoléculas con las investigaciones de Hermann Staudinger en 1918, que las industrias químicas dedican esfuerzos y recursos de investigación al desarrollo de nuevos materiales sintéticos. La mayoría de los polímeros sintéticos de interés comercial que se conocen hoy fueron

producidos industrialmente en el período interguerra. La segunda guerra mundial aumentó la demanda de estos materiales y después de ella su demanda se hizo explosiva con la aplicación de los materiales sintéticos en campos inusitados<sup>5</sup>.

## VIEJOS PARADIGMAS

La ingeniería química como disciplina no nace como una curiosidad de científicos para explicar fenómenos o procesos naturales desvinculados de la producción industrial, sino que surge a comienzos del siglo XX en la urgencia de un conocimiento necesario para racionalizar la producción de sustancias químicas y materiales, y como un reconocimiento de la ausencia, en la química industrial y en la ingeniería mecánica, de un patrón de análisis y solución de ciertos problemas tecnológicos de las industrias de procesos químicos.

Como disciplina, la ingeniería química de hoy está estructurada alrededor de dos paradigmas esenciales, que se han sucedido históricamente como etapas de evolución y estructuración de un sistema de conocimientos sobre fenómenos y procesos vinculados a la elaboración de sustancias y materiales mediante cambios químicos y/o cambios en propiedades físicas de la materia. Pero, antes de la organización de este conocimiento, la ingeniería química pasó por un período preparadigmático. Era básicamente una extensión de la ingeniería mecánica a los problemas de la manufactura de sustancias y materiales químicos. La educación de sus profesionales se hacía mediante el método de casos, con una instrucción centralizada en la descripción de la química industrial con el estudio de la ingeniería mecánica requerida. Con esta metodología se enseñaba por ejemplo, cómo hacer carbonato de sodio, cómo hacer ácido sulfúrico o cómo producir sal de agua marina.<sup>12</sup>

Fue Arthur D. Little, en 1915, el que inventó el primer paradigma de la ingeniería química. Él le propuso al rector del Instituto Tecnológico

de Massachusetts (MIT), en un reporte de visita a esta universidad, “que la educación en ingeniería química debería estar centrada en las *“operaciones unitarias”: un estudio de las etapas comunes de muchos procesos industriales, tales como transferencia de calor, destilación, flujo de fluidos, filtración, trituración, molienda, y cristalización*”<sup>13</sup>. Este primer paradigma se constituye en la primera aproximación analítica de las industrias de procesos químicos como sistemas análogos que comparten unidades de transformación similares, en las que se suceden fenómenos cuyo comportamiento general es independiente de la naturaleza específica de las sustancias en proceso.

Después de muchos años de éxito de utilización del modelo de las operaciones unitarias, de estudio de estas operaciones separadas de procesos industriales específicos, y de abordaje y solución empírica de los problemas de escalamiento industrial, se consideró que *la comprensión de los fundamentos científicos de los fenómenos y procesos de transformación de la materia y la matemática*, eran herramientas poderosas para el análisis y estudio de la tecnología de procesos químicos. Aparece así una corriente manifiesta en la educación y en la investigación en ingeniería química, que *busca explicaciones moleculares para los fenómenos macroscópicos*. El evento histórico que capturó esta tendencia y dió nacimiento al segundo gran paradigma de la ingeniería química lo constituyó la publicación en 1960 del libro *Fenómenos de Transporte*, de Bird y Lightfoot. Ofrecía esta publicación una lógica distinta para el análisis y estudio de los fenómenos fisico-químicos, poniendo más énfasis en la comprensión de los principios físicos básicos que eran ignorados u oscurecidos por los métodos empíricos<sup>14</sup>. Con el segundo paradigma se afina la concepción sistémica de las industrias de procesos químicos, en la medida en que descubre que el comportamiento macroscópico de las unidades de transformación emerge del comportamiento molecular de las sustancias en proceso.

El esfuerzo de organización del conocimiento de la ingeniería química como disciplina, traducido en la formulación de los dos paradigmas esenciales, le confieren a la ingeniería química identidad e independencia de sus disciplinas madres: la química industrial y la ingeniería mecánica.

## NUEVOS PARADIGMAS

Si bien los dos paradigmas señalados han posibilitado la solución de muchos problemas en ingeniería química, su universo de aplicación está limitado a procesos químicos convencionales y el segundo, particularmente, a sistemas con régimen laminar. Pienso que hoy se vienen configurando desde las ciencias básicas: química, física y biología, fundamentos científicos para estructurar dos nuevos paradigmas que ampliarán el horizonte a la ingeniería química y que permitirán resolver problemas a los que se les ha dado soluciones incompletas con métodos puramente empíricos.

El tercer paradigma puede nacer de contribuciones de la teoría del caos, la teoría de los procesos irreversibles y la modelación molecular, especialmente la modelación apoyada en teorías y principios teóricos del comportamiento molecular y microscópico como resultado de la estructura molecular y las interacciones moleculares. Este tercer paradigma podría interpretarse como una teoría generalizada del segundo paradigma, análogo a lo que es la mecánica relativista para la mecánica clásica; el cual *ampliaría la comprensión de los fundamentos científicos de los fenómenos y procesos que se explotan en las unidades de transformación de las plantas de procesos químicos. La explicación de la relación entre el comportamiento molecular, las interacciones moleculares, los fenómenos a nivel de la microescala que se dan en las parcelas de fluido, y el comportamiento macroscópico de las operaciones y procesos unitarios sería el objeto del tercer paradigma*. Con los instrumentos analíticos y matemáticos del tercer paradigma se podrían abandonar los

conceptos de coeficientes de fricción, de transferencia de calor y de transferencia de masa, entre otros, o correlacionarlos directamente con propiedades moleculares y otras variables y parámetros del sistema.

También la biología molecular y la ingeniería genética ofrecen conocimientos que pueden ser la base para construir un cuarto paradigma de la ingeniería química. Este cuarto paradigma se requiere para analizar y estudiar los fenómenos y procesos biológicos en la elaboración de sustancias químicas y materiales. Esta alternativa de producción, la planta de procesos biológicos - con biorreactores y bioseparadores - en la que *las transformaciones físicas y químicas son derivadas o resultados de procesos biológicos*, entre otras ventajas permitiría la producción limpia y sostenible ambientalmente de sustancias y materiales biodegradables, intensiva en información y ahorradora de energía. La nueva lógica para el análisis de las industrias de “bioproducción” de sustancias y materiales rompería, en algunos casos, con los modelos creados por los dos primeros paradigmas para la industria de procesos exclusivamente químicos. *Cada unidad de biorreacción o de bioseparación, para efectos de su análisis, modelación y diseño, podría verse como una población de microunidades de transformación - células, microorganismos- confinadas en un macroequipo mecánico.* Este último paradigma abrirá las compuertas de la ingeniería química más allá de los límites de la industria de procesos químicos y extenderá su universo de aplicación a un nuevo sector industrial: la industria de procesos bioquímicos, donde convergen la química y la biotecnología para configurar la “bioquimitecnología”.

Estos dos nuevos paradigmas se integrarían como elementos complementarios al sistema conceptual actual de la ingeniería química para darle una mejor organización y una mayor potencia analítica y explicativa de los fenómenos, procesos y sistemas de los que se ocupará esta disciplina.

## RETOS Y OPORTUNIDADES

Son muchos los problemas y retos que enfrenta la industria de procesos químicos convencionales y también numerosas las oportunidades que le ofrecen nuevos conocimientos en las ciencias básicas- química, física, biología -, así como las demandas expresas y latentes en las nuevas tecnologías como la microelectrónica, la informática y las comunicaciones, y de otras industrias emergentes. El enfrentamiento de estos retos y la explotación de las oportunidades con innovaciones permitirá reconfigurar la base tecnológica de la industria de procesos químicos convencionales y ampliar el universo de aplicación de la ingeniería química a áreas industriales inexistentes.

En el campo de los procesos, la industria de procesos químicos enfrenta grandes retos:

- “El desarrollo de procesos más aceptables socialmente”<sup>15</sup>, aún para elaborar sustancias y materiales inocuos ambientalmente, debido a una creciente preocupación por un desarrollo sostenible ambientalmente y el aumento de restricciones ambientales expresas en legislaciones. Este compromiso con el desarrollo sostenible le plantea a la ingeniería química la búsqueda de soluciones a la disposición de desechos peligrosos y el diseño de procesos que minimicen la emisión de contaminantes. Este reto crea la oportunidad de rediseñar procesos que no creen desechos peligrosos y produzcan subproductos que puedan entrar en las cadenas productivas o que generen sustancias que se puedan manejar y disponer de forma segura, o concebir sistemas que conviertan los desechos peligrosos en sustancias manejables o útiles.<sup>16</sup>
- “Desarrollo de procesos que utilicen nuevas materias primas y de más baja calidad”<sup>16</sup>. La principal fuente de materia prima en los últimos cincuenta años ha sido el petróleo y otros materiales naturales que están en agotamiento o están disponibles

con calidades más baja; podría pensarse en el carbón, gas, minerales o la biomasa como nuevas fuentes de materias primas para los procesos químicos y bioprocesos del futuro.

- Diseño de plantas con tamaños económicos mínimos más pequeños, costos de construcción más bajos, equipos estándares y modulares, y plantas flexibles multiproductos. Esta nueva lógica de diseño resolvería problemas de economía de escala y el problema de que “ los costos de personal involucrados en la fabricación de equipos y construcción de plantas químicas son mayores que los costos de personal de operación y mantenimiento durante la vida económica de la planta.”<sup>17</sup>
- Desarrollo de nuevos procesos que incorporen innovaciones tecnológicas como las que se vienen dando con la hibridación de procesos y operaciones unitarias como la destilación reactiva, membrana catalítica, extracción líquido-líquido reactiva. Es decir combinar en una forma concurrente en una misma unidad o equipo operaciones unitarias y procesos unitarios como reacciones, separaciones, intercambio calórico, etc .
- Desarrollo de bioprocesos y diseños de plantas en las que se exploten tecnologías derivadas de los avances de la ingeniería genética como: modificación del DNA de células para que sobreproduzcan la sustancia deseada (insulina, alfa-interferona, hormona del crecimiento humano, etc.), o manipulación del DNA de la célula para que cambie sus procesos metabólicos para manufacturar una sustancia deseada como por ejemplo la producción del polímero biodegradable polihidroxibutilato con modificaciones genéticas de células e-coli.<sup>18</sup>

También la ingeniería química enfrenta el reto de desarrollo de nuevos materiales y sustancias con propiedades y usos muy específicos:

- Un primer reto en el campo de los productos y materiales lo constituye el desarrollo de productos y materiales ambientalmente aceptables como: combustibles, sustitutos de compuestos fluorocarbonados y materiales poliméricos no contaminantes o reciclables.
- El desarrollo y producción de materiales avanzados con propiedades y usos muy específicos como las cerámicas estructurales y funcionales, materiales superconductores, materiales compuestos (composites), y polímeros diseñados con usos específicos, también está en la agenda de necesidades y oportunidades de la ingeniería química futura.
- Aunque la industria química siempre ha sido productora de químicos especiales, muchos de los productos de usos generalizados nacieron como químicos especializados, hoy existe una demanda creciente y variada de estos productos. En el futuro se prestará mucha mayor atención al desarrollo y a la producción de químicos especiales - materiales con alto valor agregado y propiedades y usos y desempeños muy específicos o sofisticados. Entre estos materiales se incluyen: químicos electrónicos usados para la elaboración de chips, reactivos para diagnósticos, lubricantes sintéticos, catalizadores, polímeros de alto desempeño resistentes a altas temperaturas (como las poliamidas) y a condiciones químicas agresivas, pigmentos, tintas, aditivos, sabores, fragancias y drogas.

El mayor interés en los químicos especiales y materiales avanzados tendrá un gran impacto en la ingeniería química. La ingeniería química ha sido hasta ahora una profesión orientada hacia los procesos; en esencia una ingeniería de procesos. Como el problema central de estos materiales es encontrar el uso correcto y

el mercado apropiado, los ingenieros químicos tendrán que aprender mucho más sobre sus propiedades y adquirir un profundo conocimiento para correlacionar propiedades con usos y desempeños. Sugiere esta necesidad que la ingeniería química tendrá que integrar la ingeniería de producto con la ingeniería de proceso, más si se tiene en cuenta que las propiedades de algunos materiales avanzados y químicos especiales son altamente dependientes del proceso de manufactura utilizado. Además, como la escala de producción es más pequeña, comparada con la de químicos tradicionales, estos materiales deberán producirse en plantas discontinuas, multipropósitos y flexibles, retornando la ingeniería química a los procesos batch, supuestamente ya superados con la lógica de la producción masiva introducida como paradigma en la industria de procesos químicos<sup>16</sup>.

### ***NUEVAS HERRAMIENTAS Y TECNOLOGÍAS***

El desarrollo futuro de la ingeniería química no sólo se dará por los retos y oportunidades para el desarrollo de nuevos productos y procesos, generados por las demandas de la microelectrónica, las comunicaciones, la informática, y otras industrias emergentes, o por el mejoramiento de los procesos convencionales, sino que también estará caracterizado por la introducción a las industrias de procesos químicos de nuevas herramientas y tecnologías<sup>19</sup>.

La primera herramienta que ha transformado la práctica de la ingeniería química más que cualquiera otra en el pasado, es el computador. Esta modificación se observa en el diseño, operación rutinaria y en las comunicaciones. “La increíble velocidad y capacidad de procesamiento de los computadores de hoy, permite la comprensión y manipulación de sistemas multivariab-

altamente complejos, que le sería imposible a un ser humano manejar sin su ayuda. La modelación y simulación por computador permite que los procesos sean diseñados y optimizados simultáneamente para numerosas variables incluyendo aún variables como factores ambientales y sincronización con el mercado”<sup>19</sup>.

### **SIMULACIÓN MOLECULAR**

El computador también ha permitido introducir para el diseño de productos una técnica de alcance inimaginable: la simulación molecular. La ingeniería inversa o retrosíntesis es la base de la modelación molecular, que comienza con el concepto de un nuevo producto y luego trabaja hacia atrás para desarrollar una forma de producirlo. En su forma más simple la simulación molecular predice propiedades desde la estructura molecular. Con estos programas se puede obtener datos de equilibrio de fases, predecir propiedades mecánicas, capacidades calóricas, calores de formación y reacción, solubilidades, propiedades de transporte, y hasta diseñar la molécula indicada a partir de las propiedades deseadas. Los programas de simulación molecular (Cranium, BatchDesign-Kit, Synapse, Synthia, etc.) son diseñados a partir de datos empíricos, con los que se genera una base de datos que correlaciona propiedades con grupos de átomos en los que se divide la molécula; o diseñados con base en teorías, por ejemplo algunos usan modelos de la termodinámica estadística o métodos de la mecánica cuántica<sup>20</sup>.

En el futuro será posible, para producir una sustancia química específica o material específico, entrar a un programa de computador las propiedades deseadas y obtener no un modelo del producto sino hasta los planos completos del proceso para hacerlo. El uso de la modelación molecular no sólo está reduciendo los costos y el tiempo de desarrollo de los productos y procesos, sino que también se beneficia el diseño de los equipos.<sup>21</sup>

## SIMULACIÓN DINÁMICA

La introducción del computador en las plantas de procesos químicos también permite la utilización de la simulación dinámica tanto en la operación de procesos continuos, para ajustar la producción diaria para tener en cuenta variables externas como demanda, precios de materias primas, así como en el diseño y operación de plantas discontinuas de manufactura flexible para establecer condiciones de diseño y operación eficientes<sup>19</sup>.

## SISTEMAS EXPERTOS

La inteligencia artificial ha empezado a invadir las industrias de procesos químicos; ya son conocidas aplicaciones de sistemas expertos, redes neuronales, lógica difusa y algoritmos genéticos. Estas tecnologías tienen aplicaciones en la simulación, optimización y diseño de procesos, en sistemas de entrenamiento de personal, en programación de producción y personal, en gerencia de proyectos, en sistemas soportes para el mejoramiento de la calidad o para ayudar a operadores y técnicos en la toma de mejores decisiones para el desempeño de la planta, en sistemas de diagnóstico de problemas en equipos y plantas, y en sistemas de control más riguroso y eficiente.<sup>22</sup>

Los sistemas basados en conocimientos se crean usando conocimientos de expertos humanos, así como de las ciencias básicas y la ingeniería. La base de conocimientos se puede mejorar continuamente con la entrada continua de información por las personas que usan el sistema o por el conocimiento adicional ganado por inferencia que hace el sistema a través de su propia "experiencia". Estos sistemas son útiles, por ejemplo, en la síntesis y diseño de procesos, en el que proveen no sólo información sino herramientas para hacer mejores juicios<sup>23</sup>.

Otra aplicación está en el análisis de alarma y manejo de situaciones anormales de operación

en planta. Un operario puede tomar decisiones cruciales rápidamente si está auxiliado por un sistema experto que le anticipa al operador condiciones anormales mucho antes de que suene una alarma. El sistema le puede proveer información soporte para la decisión, tales como posibles causas del problema y opciones para su decisión. Un sistema experto también puede diseñarse para monitorear un proceso en tiempo real, interpretar las condiciones de alarma, y alertar a operarios y técnicos sobre posibles acciones de corrección. Más aún, un sistema de éstos puede usarse para hacer control proactivo de un proceso, si está diseñado para recoger datos y calcular tendencias estadísticas, suministrar una interpretación y alertar sobre tendencias estadísticas de variables claves del proceso antes de que ocurra una perturbación en el sistema<sup>19, 23</sup>.

## REDES NEURONALES

Las redes neuronales son excelentes candidatas para resolver un amplio rango de problemas en la industria química. Entre ellos se puede mencionar la clasificación de materias primas multicomponentes, reconocimiento de patrones y análisis de composición química, interpretación cualitativa de datos de procesos, control adaptativo, detección de fallas de sensores, modelación, caracterización y optimización de unidades de procesos -por ejemplo reactores-, modelación de fenómenos escasamente comprendidos como el flujo turbulento. Las redes neuronales imitan procesos de aprendizaje humano. Los humanos generalmente aprenden por ensayo y error. Las redes neuronales operan en forma análoga.<sup>23</sup>

La red neuronal es una arquitectura de programa de computador para cómputo no-lineal, que consiste en un arreglo de elementos de procesamiento en bloque altamente interconectado asemejando las redes mucho más complejas de neuronas biológicas. Las redes neuronales analizan datos de un sistema y a través de un proceso de "aprendizaje" genera un modelo interno que



relaciona los datos. Este modelo interno no está basado en ninguna especificación del mecanismo subyacente para el proceso. Para la generación del modelo no se requiere de una comprensión previa de los fundamentos de los procesos o los fenómenos que se modelan. Esta característica las hace ideales para modelar sistemas complejos en los que convergen fenómenos de transferencia de calor, mecánica de fluidos, transferencia de masa, fenómenos cinéticos y catalíticos, que aunque puedan ser descritos mediante ecuaciones diferenciales pueden tener problemas de solución por su no-linealidad. Ellas también permiten una inversión en la operación de los modelos de simulación, mientras los convencionales determinan condiciones de salida o valores de variables dependientes a partir de un conjunto de datos de entrada o de variables independientes, las redes neuronales permiten el cálculo de condiciones de entrada dado un conjunto de datos de salida del sistema.<sup>24</sup>

## LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa es una alternativa de control valiosa para procesos que no pueden describirse con un modelo matemático o su desarrollo es muy complejo. El control lógico difuso utiliza una descripción del proceso mediante reglas, o heurística, que son desarrolladas a partir de un conocimiento seguro del proceso. También se utiliza esta tecnología en los sistemas expertos basados en conocimiento.

## ALGORITMOS GENÉTICOS

La inteligencia artificial también ofrece los algoritmos genéticos como rutinas de búsqueda en optimización. Los algoritmos genéticos pueden compararse con el proceso biológico de la evolución natural de ciertas características de una especie que pasan de generación en generación y contribuyen a su supervivencia y mejoramiento de la población a medida que

ciclo evolutivo avanza; de la misma manera funcionan los algoritmos genéticos para encontrar soluciones adaptativas en ambientes dinámicos. El algoritmo arranca con una muestra de solución aleatoria y a través de su proceso genera nuevas generaciones de soluciones hasta cumplir los criterios de optimización.

## INNOVACIONES EN OPERACIONES UNITARIAS

Las operaciones unitarias convencionales serán siempre objeto de mejoras, pero se está observando un creciente interés en las operaciones unitarias no convencionales como la separación cromatográfica y separación por membranas. Aún más revolucionario aparece la hibridación de operaciones unitarias y procesos unitarios. La mayor tendencia en este campo es la combinación en forma concurrente de reacciones, operaciones de separación y transferencia de calor para reducción de costos, reducción de formación de subproductos o desechos y o eliminación de reacciones colaterales para mejoras en rendimientos y selectividad de reacciones. La destilación reactiva, por ejemplo, está siendo utilizadas en la producción de metil ter-butil eter, ter-amil metil eter y etil ter-butil eter; y las membranas catalíticas, en particular, se están usando como catalizadores que a la vez funcionan como tamices para separar el producto una vez se forma<sup>19</sup>.

Pero el conjunto de innovaciones que se vienen produciendo no sólo se reducen a las operaciones unitarias, también ha invadido las unidades de reacción. Hay una gran presión en la industria de procesos químicos por aumentar la productividad y disminuir la producción de desechos, que ha volcado la atención sobre los reactores para que tengan un papel más activo en la separación en lugar de ser recipientes pasivos en esta función. La mayoría de los esfuerzos de redefinición de los reactores están orientados a mejorar conversión, rendimiento y selectividad.<sup>24</sup>

## REACTORES MULTIFUNCIONALES

Entre las tecnologías multifuncionales en reactores que se vienen desarrollando la más avanzada es la destilación reactiva usada hoy principalmente para reacciones de eterificación y esterificación; en ella el catalizador se coloca en los internos de la torre para que se de simultáneamente la reacción y la separación. La que le sigue son las membranas catalíticas para producir por ejemplo etano y etileno a partir de metano, anhídrido maléico como precursor en la producción de poliéster y reformado de metano con vapor de agua. Pero estas combinaciones continúan con desarrollos en adsorción reactiva y cromatografía reactiva.<sup>25</sup>

La imaginación en las innovaciones en los reactores no se agota en la hibridación. En Francia se está trabajando en planta piloto para oxidar ciclohexanol a ciclohexanona utilizando ultrasonido. Otro grupo ha construido un reactor sonoelectroquímico, a escala de laboratorio, para oxidar fenol de aguas residuales. Du Pont está usando microonda en reacción de ácido cianhídrico, y la universidad de Bradford en el Reino Unido está estudiando reactores basados en radiofrecuencias para el cracking de petróleos pesados.<sup>26</sup>

## MICRORREACTORES

Existe también una línea de innovaciones en el campo de los microrreactores, con varias aplicaciones. Esta tecnología se viene desarrollando para usarla en procesos que son ineficientes o riesgosos a gran escala, como por ejemplo para producir químicos altamente tóxicos, con reacciones explosivas o altamente exotérmicas. Algunos diseños geométricos se apartan de los reactores tubulares y de tanque agitados convencionales; aunque la universidad de Kyoto en Japón está trabajando con microrreactores tubulares con diámetros de tubos por debajo de 1 milímetro. Hay diseños constituidos por microcanales de paredes delgadas que se graban en láminas de

metal, cerámica, vidrio u otro material. Los canales se hacen mediante micromaquinado con láser, maquinado con descarga eléctrica, fotolitografía u otra técnica. Los tiempos de residencia en estos reactores llegan a ser extraordinariamente pequeños. Pacific North-West National Laboratory en Washington ha realizado oxidación parcial de hidrocarburos con tiempos de 1 a 10 microsegundos, comparado con 1 segundo en reformadores con vapor convencional. Para la producción a gran escala se disponen en paralelo tantos reactores como sea necesario para lograr el volumen de producción requerido.<sup>27</sup>

Los microrreactores también están siendo utilizados con el impulso que viene tomando la química combinatorial. La química combinatorial está siendo usada en los laboratorios de investigación y desarrollo para hacer y probar simultáneamente muchos compuestos químicos - hasta 4000 compuestos por día - debido a la necesidad de acelerar los procesos de desarrollo. La síntesis se hace en una planta diminuta automatizada que tiene microrreactores -con tamaños de 1 a 10 mililitros- acopladas a otras microunidades para intercambio de calor y transporte de fluidos. Estas plantas se montan en módulos de cerca de 1 ft<sup>2</sup>, y son controladas por computador con brazos robóticos para alimentar a los microrreactores y sacar muestras para análisis <sup>21</sup>.

## NUEVOS INSTRUMENTOS

La electrónica no sólo se ha beneficiado de los avances de la ingeniería química con los materiales que le proporciona con propiedades excepcionales para aplicaciones novedosas en la elaboración de componentes electrónicos, medios magnéticos, fibra óptica, etc, sino que ha influido significativamente en el desarrollo de la ingeniería química con el computador y el desarrollo de nuevos instrumentos de medida y control.

Una referencia obligada merecen los instrumentos de medida de no-contacto que usan ultrasonido, luz infrarroja o rayo láser. Hoy se dispone

## REFERENCIAS

1. AROCENA RODRIGO, “Acerca de la prospectiva (desde algunos países Latinoamericanos), en Eduardo Martínez (editor), “Estrategias, planificación y gestión de ciencia y tecnología”, Nueva Sociedad, Caracas, 1993.
2. BEINSTEIN, JORGE, “Prospectiva tecnológica: conceptos y métodos”, en Eduardo Martínez (editor), “Ciencia , tecnología y desarrollo: interrelaciones teóricas y metodológicas”, Nueva Sociedad, Caracas , 1994.
3. BHAGAT, PHIZ, “An introduction to neural nets”, Chemical Engineering Progress, August, 1990.
4. CHOPEY, N.P., ONDREY, G., PARKINSON, G., “Microreactors find new niches”, Chemical Engineering, March, 1997.
5. CROWE, EDWARD R., Vassiliadis, A. “Artificial Intelligence: Starting to realize its practical promise”, Chemical Engineering Progress, January, 1995.
6. DIAZ DE LOS RIOS, MANUEL, “La ingeniería química en los albores del siglo XXI”, Ingeniería Química, No 344, Marzo, 1998.
7. ESCORSA PERE, De la Puerta Enrique, “La estrategia tecnológica de la empresa: una visión de conjunto”, Economía Industrial, Barcelona España, Septiembre-Octubre, 1991.
8. GERVASIO G.J., PELLETIER M.J., “Monitor with improved Raman spectroscopy” Chemical Engineering, February, 1997.
9. IBID
10. IBID
11. IBID
12. IBID
13. IBID
14. IBID.
15. IBID.

de medidores ultrasónicos de nivel, flujo, presión, temperatura y propiedades físicas. Monsanto está usando, desde 1995, espectrómetros Raman para monitorear especies químicas en reactores industriales<sup>28</sup>. El Centro de Investigaciones de Karlsruhe y la firma Sonotech GmbH en Alemania, han desarrollado un sensor ultrasónico capaz de medir propiedades físicas de fluidos, tales como viscosidad y densidad. Para la medida de temperatura en procesos donde el producto sea frágil o susceptible de contaminación, o donde las condiciones del proceso sean agresivas o difícil el acceso al punto de medición, se dispone en el mercado de termómetros infrarrojos<sup>29</sup>.

## NUEVO CURRÍCULO

El currículo para formar los ingenieros químicos del futuro también sufrirá cambios. En él no sólo debe incorporarse nuevos conocimientos, sino contemplar el desarrollo de nuevas habilidades y destrezas, y ofrecer un ambiente de aprendizaje abierto y flexible, en el que se explote la potencialidad de las nuevas tecnologías educativas que ofrece el computador, las bases de datos, los sistemas expertos, la multimedia y las telecomunicaciones. En el campo del conocimiento es necesario ampliar la base científica y profundizar el conocimiento en fundamentos en química, física y biología. En el desarrollo de habilidades y destrezas es necesario el adiestramiento general en solución de problemas, modelación matemática, simulación, y operaciones intelectuales para el pensamiento crítico y creativo. Esto exige cambios en las

metodologías. El aprendizaje debe hacerse a través de problemas abiertos con participación más activa de los estudiantes; mostrando la “teoría en acción” - mediante simulación virtual de ambientes, fenómenos y procesos reales, o vinculándolos a la práctica en problemas concretos de ingeniería química (learning by doing) -, a través de la cual se redescubran o verifiquen teorías, principios y leyes que conforman el nuevo cuerpo conceptual de la ingeniería química.

## CONCLUSIÓN

“Resultaría difícil imaginar un mundo sin el desarrollo de la química y la ingeniería química, muchas de las comodidades que disfrutamos hoy no serían posibles sin ellas, sin la común aspirina, por no hablar de potentes drogas para el alivio o cura de enfermedades, sin las supercomputadoras, las fibras ópticas”<sup>30</sup>, tampoco lo más obvio, nuestra indumentaria diaria. La ingeniería química seguirá siendo insustituible en el mundo moderno, pues la industria de producción de sustancias químicas y materiales es un eslabón obligado en la cadena productiva no sólo de todas las demás actividades industriales sino también de muchas del sector de servicios. La ingeniería química no sólo tiene futuro sino que además es indispensable para el desarrollo de la tecnología electrónica, de la informática, de las comunicaciones, en fin de las tecnologías motrices de la quinta revolución industrial. - de acuerdo con la taxonomía del desarrollo tecnológico propuesta por Carlota Pérez<sup>8</sup>.

16. IBID
17. IBID.
18. IBID.
19. KOCH, DAVID H. "The future: Benefiting from new tools, techniques, and teaching", Chemical Engineering Progress, January, 1997.
20. KROPP, E.P., "The Chemical process industries: broadening the bases", Chemical Engineering Progress, January, 1997.
21. LAGOWSKI, J.J., "Viewpoints: Chemist on Chemistry. Chemical Education: Past, Present and Future", Journal of Chemical Education, Vol. 75, N° 4, April 1998.
22. LANDAU, RALPH, "Education: Moving from Chemistry to Chemical Engineering and beyond", Chemical Engineering Progress, January, 1997.
23. ONDREY GERALD, KIM IRENE, PARKINSON GERALD, "Reactors for 21st century", Chemical Engineering, June, 1996.
24. PÉREZ, CARLOTA, "Las nuevas tecnologías: una visión de conjunto", en Ominami Carlos (editor), "La tercera revolución industrial", grupo Editor Latinoamericano, 1986.
25. REUBEN, B.G., Burstall, M.L., "The Chemical economy", Longman Group Limited, London, 1973.
26. SANDER, JOHN H., "Chemical Engineering in the 80s: Turning problems into opportunities", Chemical Engineering Progress, February, 1981.
27. SHANLEY, AGNES, "Molecular modeling it's not just for chemist anymore", Chemical Engineering, January, 1996.
28. SHINNAR, REUEL, "The future of Chemical Engineering", Chemical Engineering Progress, September, 1991.
29. SHINNAR, REUEL, "The future of the chemical industries", CHEMTECH, January, 1991.
30. WEI, JAMES, "A century of changing paradigms in chemical engineering", CHEMTECH, May 1996.