

Posibilidades de innovación en la industria de procesos químicos en Colombia

*Heberto Tapias García**, *Xiomara Monsalve Meléndez***, *Álvaro Quintero Posada****

(Recibido el 11 de febrero de 2002)

Resumen

El artículo señala posibilidades de innovación en materias primas, procesos, productos, unidades de transformación (operaciones unitarias y reactores), así como en prácticas de organización, gestión y de relaciones en la industria de procesos químicos en Colombia. El universo de oportunidades sugerido nace del análisis de tendencias, retos y problemas identificados de la evolución histórica de este sector industrial en los ámbitos mundial y local, y de la necesidad de superar el proceso de desindustrialización del país como resultado de la apertura y globalización de la economía.

----- *Palabras clave:* innovación, evolución industrial, procesos químicos, retos y problemas, nuevas tecnologías.

Innovation possibilities in chemical process industry in Colombia

Abstract

Innovation possibilities about raw materials, processes, products, transformation units —unit operations and reactors— are pointed out in this essay, as well as, organization, relationship and management practices in chemical process industry in Colombia. The range of opportunities suggested stems from the analysis of trends, challenges and problems identified in the historical background of this field at a worldwide and a local level, and from the need to stop and reverse the deindustrialization process of the country as a result of the opening and globalization of the economy.

----- *Key words:* innovation, chemical process industry evolution, problems and threats, new technologies.

* Profesor Ingeniería Química. Universidad de Antioquia.

** Estudiante de Maestría en Gestión Tecnológica. Universidad Pontificia Bolivariana.

*** Profesor Facultad de Salud Pública. Universidad de Antioquia.

Introducción

Se señalan algunas posibilidades de cambios tecnológicos e innovaciones en la industria colombiana de procesos químicos, éstas se basan en las tendencias evolutivas de la tecnología de procesos químicos y bioquímicos y en los retos y problemas que enfrenta este sector industrial en los ámbitos mundial y nacional los causados por el proceso de desindustrialización, resultado de la apertura y la globalización de la economía.

Se sugieren oportunidades relacionadas con materias primas, productos, procesos, unidades de transformación básicas —operaciones unitarias y reactores—, así como en los mercados y en la organización y gestión empresarial de las industrias de procesos químicos en Colombia.

Para justificar y contextualizar las oportunidades de innovación se hace una síntesis histórica de la evolución de la industria mundial y nacional de procesos químicos, así como una identificación de problemas y retos que enfrenta este sector industrial en el mundo.

Evolución de la industria de procesos químicos

En cierto sentido siempre ha existido una “industria” de procesos químicos. Durante siglos el hombre ha necesitado jabones, colorantes, pigmentos, venenos, cosméticos, vestidos, medicamentos, y muchas otras sustancias que eran producidas tradicionalmente de manera artesanal doméstica y en muy pequeña escala. Y aunque la producción y uso de estos materiales y sustancias químicas data de antiguas civilizaciones, la evolución de lo que conocemos hoy como la industria de procesos químicos moderna sólo comenzó con la revolución industrial, la primera, la ocurrida a finales del siglo XVIII en Inglaterra. La industria química —uno de los subsectores de la industria de procesos químicos— fue componente importante de esa revolución industrial, que habría sido incompleta sin los productos químicos efectivos y baratos para

el blanqueo, teñido y limpieza de las fibras requeridas y tejidos elaborados por la industria textil [14].

La industria de procesos químicos, que apenas producía unos pocos productos químicos inorgánicos, papel y vidrio, era pequeña en el siglo XIX, generaba productos de naturaleza inorgánica para industrias paraquímicas como la de producción de jabón y la textil, la agricultura, la minería y las actividades de construcción de ferrocarriles, canales, y vías. La demanda inicial fue por ácido sulfúrico, soda cáustica, superfosfato, sulfato de amonio, carbonato de sodio, cloro blanqueador y algunos colorantes sintéticos; los cuales eran producidos básicamente a partir de piritas, carbón, caliza, sal y roca fosfórica, a través de la destilación del carbón, el proceso de cámara de plomo para producir ácido sulfúrico y el proceso Leblanc para álcali y polvo blanqueador. Estos procesos constituyeron el corazón de la industria química hasta finales del siglo XIX [14].

A finales del siglo XIX la estructura de tal industria sufrió modificaciones significativas a raíz de las innovaciones en la producción de álcali y cloro y, particularmente, por los nuevos desarrollos en los colorantes [14]. Inicialmente el proceso Leblanc fue sustituido por el proceso Solvay —el primer proceso continuo usado en la industria química— en la producción de álcali y más tarde fue rematada con la aparición de la ruta electrolítica para la obtención de hidróxido de sodio y cloro.

El campo de los colorantes fue el sector más dinámico gracias a la excelencia alemana en la aplicación de la teoría química y el uso de la investigación aplicada. Esta industria experimentó rápidos y continuos cambios tecnológicos, convirtiéndose en el embrión de la industria química moderna. En los años de 1860 nace la industria química orgánica con la explotación del primer colorante sintético, la malva, desarrollado en 1856 por William Henry Perkin (Heaton, 1994). El primer éxito comercial fue la síntesis de alizarina en 1868, seguido en 1870 por los colorantes azo

y los azufrados en 1880 (Reuben, 1973). Las empresas de colorantes usaron sus conocimientos y capacidades tecnológicas, así como importantes recursos financieros para intensificarse y diversificarse. Luego incursionaron en la industria farmacéutica en la cual desarrollaron rápidamente productos valiosos como la aspirina en 1898 por Bayer, y el salvarsan, un agente antisifilítico, desarrollado por Hoechst en 1910. Estos desarrollos fueron sucedidos por innovaciones en productos muy variados como los reactivos químicos y películas fotográficas, aditivos para cauchos y polímeros sintéticos.

La industria alemana de los colorantes se enfrentó durante la Primera Guerra Mundial con la necesidad de manufacturar explosivos, gases venenosos, medicamentos y hasta caucho sintético, por ello fue la gran innovadora, incluso en la química inorgánica. BASF, por ejemplo, fue la pionera en el uso del proceso de contacto para la producción de ácido sulfúrico, en 1890; fue la que desarrolló el proceso Haber-Bosch para la síntesis de amoníaco por combinación directa de nitrógeno e hidrógeno; y fue la que construyó en 1913 la primera planta especializada que usó gases a altas temperaturas y presiones y que requirió de capital intensivo (Reuben, 1973).

Aunque en 1914 era la segunda en importancia, después de la alemana, la industria química norteamericana estaba especializada en la química inorgánica y su producción de colorantes era pequeña y muchos de ellos y otros intermedios se importaban de Alemania. La agresividad comercial, la aventura tecnológica de los empresarios norteamericanos y el estallido de la Primera Guerra Mundial forzaron la expansión y diversificación de su industria de explosivos que obtuvieron mediante el proceso de fermentación del maíz, butanol y acetona. Pero más importante en el desarrollo de la industria de procesos químicos fue la conversión de los gases subproducto de las refinerías de petróleo en etanol, isopropanol y acetona, abriendo así un espacio de posibilidades de innovación muy amplio y propiciando el nacimiento de la industria petroquímica.

Las revoluciones tecnológicas desencadenadas por el motor de combustión interna —tercera revolución tecnológica— de la línea de ensamble y la petroquímica para la producción masiva de combustibles y materiales sintéticos energético-intensivos, plásticos y fibras —cuarta revolución tecnológica— generaron nuevos retos y oportunidades de innovación a la industria de procesos químicos.

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 a raíz de la innovación de Henry Ford con la producción masiva y en línea de automóviles. El reto fundamental para las industrias petroleras consistía en producir grandes cantidades de gasolina con una tecnología que superara el desempeño de las plantas primitivas de cracking térmico de 1913 [20]. Apenas en 1945 se introdujo comercialmente el cracking catalítico en lecho fluidizado, el cambio más importante en la industria de refinación del petróleo. Esto estimuló la investigación de esta tecnología en otras reacciones, y hoy es ampliamente utilizada en la producción de otras sustancias químicas como el acrilonitrilo, en procesos metalúrgicos y ensistemas de combustión para calderas e incineradores [14].

Otra innovación importante en la refinación del petróleo fue la reforma catalítica, 1940 [20], 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.

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 algunos 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 en 1869 del primer material termoplástico sintético, el celuloide, y de la primera fibra artificial, el rayón, en 1892. 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.

El advenimiento del automóvil también disparó la demanda mundial del caucho, que era satisfecha a partir del principal árbol de caucho de la especie *Hevea Brasiliensis* de las selvas amazónicas. La creciente demanda de este material y el aumento de su precio, llevó a la industria de procesos químicos a la búsqueda de un sustituto sintético, lo que se tradujo en 1909 en la primera patente relacionada con la polimerización en caliente del isopreno, componente químico básico del caucho natural, otorgada a la antigua empresa *Farbenfabriken Friedr Bayer & Co* por los trabajos de Fritz Hofmann. Constituyó este hecho la base sobre la que se asienta la moderna síntesis de los elastómeros y de los otros materiales poliméricos: los plásticos y las fibras sintéticas (Plásticos Universales, 2001).

Después de un intento fallido de los alemanes de sintetizar un caucho derivado del dimetilbutadieno, del cual alcanzaron a producir cerca de 2.500 toneladas de un caucho de pésima calidad, se produjeron varios tipos de cauchos sintéticos con propiedades específicas como la resistencia al calor, a la abrasión, a la corrosión, a la electricidad, a la acción de la luz, a los aceites y disolventes y a muchos otros productos químicos.

La lista incluye policloropreno, poliestireno-butadieno, polisobutilen, polibutadieno-acrilonitrilo, polibutadieno, polietileno-propileno, polisiloxano, polietileno clorosulfonado y polisulfuro, los cuales tienen distintos nombres comerciales de acuerdo con la empresa y su proceso de síntesis.

Quizá la contribución más trascendente del caucho, más allá de sus aportes a la tecnología del transporte, es el papel que desempeñó en uno de los capítulos más fascinantes de la química orgánica: la química de las macromoléculas. Esta contribución se remonta a 1860, cuando el químico británico Charles Henson Greville Williams descubrió que el caucho era un polímero del isopreno. Pero la química de estos materiales permaneció durante mucho tiempo como una ciencia empírica, hasta 1918 cuando Hermann Staudinger comenzó a investigar su comportamiento. La teoría predominante no daba cuenta de los factores que determinan la formación y propiedades de las grandes moléculas.

Muchos de los éxitos de la química orgánica clásica habían llevado a la aceptación implícita de varias conjeturas completamente erróneas: como que una sustancia pura debía ser un gas, un líquido o un sólido cristalino; que debía estar conformada por moléculas idénticas y que estas moléculas son muy pequeñas. Las propiedades peculiares de los grandes polímeros, en particular sus grandes masas moleculares obtenidas de medidas en solución, se explicaban como el resultado de la agregación de moléculas pequeñas que se mantenían juntas por fuerzas vagamente definidas de valencias secundarias. Como muchas otras visiones de la realidad “esta teoría explicaba todo, predecía nada, y suministraba una forma conveniente y socialmente aceptable de poner fin a problemas embarazosos”. Staudinger atacó ese pensamiento tan estereotipado y defendió vigorosamente la hipótesis macromolecular. Él demostró que los grandes polímeros no solamente son coloides en todos los solventes sino que también sus soluciones, a diferencia de los coloides micelares genuinos, no exhiben el fenómeno de envejecimiento. Investigaciones poste-

riores del mismo Staudinger, Kienle, y sobre todo de W. H. Carothers, condujeron a la formulación de las condiciones necesarias para la formación de los polímeros y la predicción de la naturaleza y características de éstos [14].

En 1930 el conocimiento de los materiales poliméricos pasó de empírico a racional y constituyó una importante rama de la química, lo que llevó directamente a nuevos productos como el nylon y el terilene, y al mejor entendimiento de los ya existentes. La mayoría de los polímeros sintéticos de interés comercial que se conocen hoy fueron producidos industrialmente en el periodo 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.

Desde 1940 la industria de procesos químicos ha crecido, con una tasa explosiva en el campo de la petroquímica durante los decenios de 1960 y 1970, y una declinación en los años recientes por el cambio de paradigma tecnoeconómico. La tasa elevada de crecimiento en las décadas de 1960 y 1970, se debió al enorme incremento en la demanda de polímeros sintéticos como polietileno, polipropileno, nylon, poliésteres y resinas epóxicas (Heaton, 1994).

La industria de procesos químicos es hoy mucho más diversa y compleja que a comienzos del siglo XX. La malla de integración del sector está conformada por la industria química y de productos asociados, la de refinación del petróleo y la petroquímica, la de cauchos y plásticos, la de pulpa y papel, la de cerámica y vidrios, y una de química fina para la elaboración de sustancias y materiales especiales con alto valor agregado y de propiedades y usos muy específicos. Su importancia económica es indiscutible como industria proveedora de insumos para otras industrias manufactureras, agrícolas, mineras, y otras actividades económicas, así como en la elaboración de productos de consumo directo. Se estimaba que al comienzo de la década del noventa ella

producía comercialmente cerca de 55.000 productos, de los cuales sólo el 10% generaba el 99,9% de la producción total, con un volumen superior a un millón de libras anuales de cada uno de ellos, sólo en los Estados Unidos [3].

Pero la variedad no se limita únicamente a la naturaleza de los productos, sino también al tipo de proceso. Los procesos de química orgánica superaron en el siglo XX los de química inorgánica y aparecieron los biotecnológicos, que resultan ser el embrión para una gran revolución en esta industria. Su desarrollo ha estado centrado en el uso intensivo de materiales y energía, altas presiones y temperaturas, con la explotación de procesos fisicoquímicos primordialmente. Pero ya se observa una tendencia muy clara a usar los procesos biológicos: los eventos o fenómenos que se dan en los organismos vivos. "En un organismo los procesos no están organizados alrededor de la energía tomada en el sentido físico de la palabra; están organizados alrededor de la información" (Drucker, 1986). El gran salto que experimentará la industria de procesos químicos se dará cuando se incorpore racionalmente la química de la vida en las plantas de procesos biotecnológicos para la síntesis de sustancias y materiales. Ya se usan microorganismos y células como reactores diminutos sumergidos en la masa de reactivos y productos. Pero cuando se debe plenamente el secreto de incorporar información de estos procesos en forma deliberada en la estructura del ADN, mediante la ingeniería genética, podrá producirse inteligentemente cualquier sustancia o material sin uso intensivo de energía, a partir de cualquier conjunto de materiales que ofrece la naturaleza.

Son muy pocas las materias primas que usa la industria de procesos químicos para obtener los miles de productos. En los siglos XVIII y XIX se limitaba prácticamente al carbón, la pirita, la sal, la caliza y la roca fosfórica. Hasta comienzos de la Primera Guerra Mundial los compuestos aromáticos eran subproductos de los hornos de coque, y los alifáticos se obtenían por fermentación o destilación de la madera. Dos rutas para pro-

ducir monómeros insaturados se explotaban en los años treinta: la deshidratación de alcohol obtenido por fermentación y la ruta carburo-acetileno. Con el advenimiento del cracking del petróleo y la reforma catalítica se introduce este recurso como la materia prima que sería más tarde la fuente no sólo de aromáticos y monómeros, sino de la mayoría de productos intermedios y precursores de la compleja red que forma hoy la industria de procesos químicos. Fue así como, en el decenio de 1930, Estados Unidos viró su industria a la producción de sustancias químicas orgánicas basadas en hidrocarburos, pero Europa sólo pudo hacerlo después de la Segunda Guerra Mundial atada por las políticas de autosuficiencia. Desde entonces el petróleo fue la materia prima universal, no sólo por su abundancia sino también por los bajos precios que mantuvo hasta antes de la crisis del petróleo en la década de 1970 y los crecientes precios del carbón, derivados de los altos costos de explotación [14].

Ligado al petróleo ha venido a sumarse el gas natural como otra materia prima importante para la industria de procesos químicos. Por el agotamiento de estos materiales se prevé un rejuvenecimiento del carbón como materia prima y el uso de la biomasa, con la incorporación de los procesos biológicos a esta industria.

En lo que respecta a los países desarrollados la industria de procesos químicos es hoy una industria madura. Madurez que alcanzó después de su explosivo crecimiento en las décadas de 1960 y 1970 (Heaton, 1994). Muchos de sus procesos para la producción de químicos básicos tienen más de veinte años y enfrentan problemas de productividad, contaminación y rentabilidad por una intensa competencia que se da a escala global. Hechos que están provocando una intensa actividad en investigación y desarrollo de nuevos procesos, pero también de nuevos productos, particularmente productos químicos especiales de la química fina como fármacos, fungicidas, germicidas y químicos electrónicos, entre otros.

Las plantas industriales en este sector tienen capacidades que van desde decenas de toneladas a unos cuantos miles por año en la industria de química fina, hasta verdaderos gigantes con decenas o cientos de miles de toneladas por año en la industria de fertilizantes y petroquímicas. Esta diferencia de capacidades establece que los químicos finos sean generalmente producidos en procesos discontinuos y que las plantas sean multiproductos, mientras que los productos químicos básicos, los precursores y fertilizantes, y commodities como el polietileno, sean producidos en plantas grandes mediante procesos continuos altamente automatizados, intensivos en capital con inversiones que rodean los cientos de millones de dólares (Heaton, 1994).

La industria de procesos químicos es una industria de alta tecnología basada en el conocimiento científico, con una componente de investigación y desarrollo significativa, que está tomando ventaja de los sistemas tecnológicos que le ofrece la nueva revolución tecnológica para generar su remozamiento e introducir nuevas trayectorias evolutivas.

Problemas y retos de la industria de procesos químicos

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 explotación de las oportunidades con innovaciones permitirá reconfigurar la base tecnológica de la industria de procesos químicos convencionales y ampliar su universo a áreas industriales inexistentes.

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

- “El desarrollo de procesos más aceptables socialmente” (Shinnar, 1991), aún para elaborar sustancias y materiales inocuos ambientalmente, debido a una creciente preocupación por el desarrollo sostenible ambientalmente y el aumento de restricciones ambientales expresadas en legislaciones. Este compromiso con el desarrollo sostenible le plantea a la industria de procesos químicos 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 [16].
- “Desarrollo de procesos que utilicen nuevas materias primas y de más baja calidad” (Sander, 1981). 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 bajas; 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 empleado 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” (Shinnar, 1991).
- 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 Ecoli [8].

También la industria de procesos químicos tiene el reto de desarrollar 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 innovación de la industria de procesos químicos.
- Aunque la industria química siempre ha sido productora de sustancias químicas especiales, muchos de los productos de uso generalizado —genéricos— nacieron especializados,

hoy existe una demanda creciente y variada de éstos. En el futuro se prestará mayor atención al desarrollo y a la producción de químicos especiales — materiales con alto valor agregado, con propiedades, usos y desempeños muy específicos o sofisticados. Entre estos materiales se incluyen reactivos 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 desarrollo futuro de la industria de procesos químicos 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 de nuevas herramientas y tecnologías que ofrece la actual revolución tecnológica en despliegue.

La herramienta que ha transformado en forma más significativa la industria de procesos químicos, y todas las actividades económicas, más que cualquiera otra en el pasado, es el computador. Esta modificación se observa en que “La modelación y simulación por computador permite que los procesos sean diseñados y optimizados simultáneamente para numerosas variables incluyendo aun variables como factores ambientales y sincronización con el mercado” [8].

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, la cual 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 estruc-

tura 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 (Shanley, 1996).

En el futuro, para producir una sustancia química o material específicos, se entrarían a un programa de computador las propiedades deseadas y se obtendría no un modelo del producto sino hasta los planos completos de la planta industrial 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 (Shanley, 1996).

El 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 a los cambios de variables externas, como demanda, precios de materias primas, o en el diseño y operación de plantas discontinuas de manufactura flexible para establecer condiciones de diseño y operación eficientes (Koch, 1997).

La inteligencia artificial ha llegado a las industrias de procesos químicos; ya son conocidas aplicaciones de sistemas expertos, redes neuronales, lógica difusa y algoritmos genéticos, que se utilizan 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 para el mejoramiento de la calidad o para ayudar

a 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 (Crowe, 1995).

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 parte de 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 (Bhagat, 1990).

También se aplican los sistemas expertos 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 anticipe condiciones anormales de operación 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 clave del proceso antes de que ocurra una perturbación en el sistema [1, 8].

Las redes neuronales resolverían un amplio rango de problemas en la industria de procesos químicos. Entre ellos se puede mencionar la clasificación de materias primas multicomponentes, reconocimiento de patrones y análisis de com-

posición 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 (Bhagat, 1990).

Las redes neuronales analizan datos de un sistema y a través de un proceso de "aprendizaje" generan 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 una comprensión previa de los fundamentos de los procesos o los fenómenos que se modelan. Esta característica hace a las redes neuronales 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 (Ondrey, 1996).

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.

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 el 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 crea nuevas generaciones de soluciones hasta cumplir los criterios de optimización.

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 o eliminación de reacciones colaterales para mejoras en rendimientos y selectividad de reacciones. La destilación reactiva, por ejemplo, es utilizada 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 (Koch, 1997).

Pero el conjunto de innovaciones que se vienen produciendo no se limitan a las operaciones unitarias, también ha invadido las unidades de reacción. La gran presión en la industria de procesos químicos por aumentar la productividad y disminuir la producción de desechos, 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 ma-

yoría de los esfuerzos de redefinición de las funciones de los reactores están orientados a mejorar conversión, rendimiento y selectividad [11].

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 estas unidades de destilación el catalizador se coloca en los internos de la torre para que se dé simultáneamente la reacción y la separación. La otra tecnología en importancia que sigue a la destilación reactiva, es la que utiliza membranas catalíticas para producir y separar el producto. Se emplean, por ejemplo, en la producción de etano y etileno a partir de metano, en la obtención de anhídrido maléico como precursor en la producción de poliéster, y en el reformado de metano con vapor de agua. Pero estas combinaciones continúan con desarrollos en adsorción reactiva y cromatografía reactiva [11].

La imaginación en las innovaciones de los reactores no se agota en la hibridación de operaciones y procesos unitarios. 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 microondas en la 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 (Ondrey, 1996).

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 reactivos químicos muy tóxicos, o 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 un 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 uno a diez microsegundos, comparados con un 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 (Chohey, 1997).

Los microrreactores también se están utilizando con el impulso que viene tomando la química combinatoria. La química combinatoria se usa en los laboratorios de investigación y desarrollo para hacer y probar simultáneamente muchos compuestos químicos —hasta 4.000 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 uno a diez mililitros— acopladas a otras microunidades para intercambio de calor y transporte de fluidos. Estas plantas se montan en módulos de cerca de $0,09\text{m}^2$, y son controladas por computador con brazos robóticos para alimentar los microrreactores y sacar muestras para análisis [17].

La electrónica no sólo se ha beneficiado de los avances de la industria de procesos químicos que le proporciona materiales 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 esta industria 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 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 (Gervasio, 1997). 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 de difícil acceso al punto de medición, se dispone en el mercado de termómetros infrarrojos (Díaz, 1998).

La industria de procesos químicos en Colombia¹

La historia de la industria de procesos químicos en Colombia se remonta al siglo XIX, después de establecida la República, cuando aparecieron los primeros intentos de establecer algunas fábricas para la producción de materiales como pólvora, envases de vidrio, locería, papel y ácido sulfúrico. De este último material se montó en Bogotá en 1840 una pequeña planta para su producción mediante la tecnología de cámaras de plomo, e incluso en Antioquia se llegó a establecer otra para el suministro de este insumo de las pilas Daniell que se usaban en las oficinas de telégrafos. Pero ninguna de estas empresas, salvo la Vidriería de Caldas, hoy Peldar S.A., sobrevivió al cambio de siglo por dificultades financieras como por la estrechez del mercado.

Los nuevos intentos de creación de industrias de procesos químicos aparecen como resultado de las políticas de desarrollo industrial de Reyes, con la construcción de la primera refinería de petróleo en Cartagena, en 1908, que durara sólo hasta

1. Toda esta sección es prácticamente una síntesis muy apretada de los registros históricos que aparecen en Poveda, G., *La química en Colombia. Ciencia, ingeniería, industria e historia*, en edición, Medellín, noviembre de 2001.

1923, y el arranque de la primera fábrica de cementos que crearon los hermanos Santiago y Miguel Samper Brush en 1909 en Bogotá. Pero también la Primera Guerra Mundial generó la necesidad de creación de nuevas fábricas para sustituir los productos que eran importados, incluyendo algunas “paraquímicas” o que involucran algún proceso químico o fisicoquímico de las materias que transforma. Aparecieron en esos años nuevas industrias para la producción de jabón, pólvora negra, aceites vegetales crudos, entre otras.

Un evento muy significativo para el desarrollo de la industria de procesos químicos en el país fue el nacimiento, entre 1918 y 1922, de la industria de petróleos en Colombia. La Tropical Oil Company se estableció en Barrancabermeja y allí instaló en 1921 la primera refinería de petróleo y comenzó a producir gasolina y algunos productos derivados.

Un hecho notable registrado en el libro del doctor Poveda, es que hasta 1933 no existía en Colombia una industria que pudiera calificarse estrictamente como industria química. Señala Poveda, que según un censo realizado por la Contraloría General de la Nación en el año 1937 había en Colombia 839 establecimientos, de los cuales algunos tenían procesos que incluían algún proceso químico o físico-químico en la transformación de la materia para producir: aceites y grasas vegetales, cemento, jabones, alcoholes y licores, bebidas gaseosas, cervecerías, fósforos, azúcar, productos farmacéuticos, cosméticos, cueros curtidos, velas esteáricas, hielo, vidrio y pinturas. Precisa el historiador Poveda que apenas en 1933 se produjo en Colombia un material químico artificial; en ese año se montó en Barranquilla una planta productora de rayón viscosa y rayón acetato. Y que posteriormente, en el periodo de 1936 a 1939, se aumentaron las ofertas de productos químicos cuando se iniciaron la producción de oxígeno, acetileno, cloro, grasas industriales y otros productos químicos.

La Segunda Guerra Mundial impuso severas restricciones para el abastecimiento en el país de

productos y mercancías que antes eran totalmente importadas; lo cual generó de nuevo la necesidad de sustitución de varios productos, y entre ellos algunos productos químicos de mayor consumo como el ácido sulfúrico, el cloro y la soda. Productos Químicos Industriales Sulfácidos S.A., situada en Medellín, introdujo al país la fabricación de un producto químico de gran demanda, que utilizaba catalizadores, y más tarde, alrededor de 1950, iniciara la producción de superfosfatos con su propio ácido sulfúrico.

El cloro y la soda que se importaban también fueron objeto de producción nacional cuando escaseó severamente como consecuencia de la guerra. Inicialmente, en 1940, la Compañía Nacional de Cloro y sus Derivados de Bogotá montó en Vitelma una pequeña planta electrolítica para producir cloro y soda cáustica, la cual se cerró después de ocho años, por los altos costos en la producción de cloro, mayor que el costo del que ahora venía de nuevo de Europa y de Estados Unidos, y porque se tenía proyectada una planta para construirse en cercanías de Zipaquirá y que comenzaría la producción en 1951. Esta planta de soda y cloro produciría cloro, más abundante y más barato, utilizando el proceso de Solvay.

Apenas terminó la guerra mundial, durante 1945 y en años siguientes se fundaron muchas empresas paraquímicas y químicas, entre ellas Pintuco para la producción de pinturas e Invequímica para la fabricación de agroquímicos y productos fitosanitarios. También en esa época vinieron a establecerse empresas extranjeras para la producción química y otros productos que demandan insumos de las industrias de procesos químicos, como: Colgate-Palmolive, para producir jabones, dentífricos y detergentes arilalquil-sulfonados, y empresas farmacéuticas norteamericanas como Elli-Lily, Parke-Davis, Home Products, Squibb, Johnson y Johnson, entre otras.

La industria química adquirió importancia en la economía colombiana desde los años 1945-1950. Desde entonces hasta 1995 o poco antes, su conjunto aumentó en tamaño económico, en número

de empresas, en variedad de productos, en complejidad tecnológica, en stock de capital y en varios otros sentidos; lo hizo en proporciones extraordinarias para el modesto nivel económico de nuestro país y para nuestra breve historia en este medio siglo [13].

El decenio de 1960 fue la década del florecimiento de la industria de procesos químicos en Colombia, después de que en el de 1950 se diera cierto crecimiento industrial que impulsó al sector químico a ensanches en la producción de fibras artificiales, de ácido clorhídrico y de ácido sulfúrico, y a la iniciación pujante de la industria química pesada representada en la planta de álcalis sódicos de Zipaquirá, y la instalación de nuevas plantas para producir silicato de sodio, sulfato de aluminio y de otros insumos químicos para usos industriales. En esos diez años nacieron y crecieron industrias antiguas y nuevas de gran importancia y con gran fuerza. Este apogeo se vivió en la producción de monómeros de hidrocarburos, de fertilizantes químicos, de resinas poliméricas, de pulpa y papel, en la fabricación de productos químicos inorgánicos, en la carboquímica, en los derivados químicos del azúcar, y en otros sectores que incluyeron lo que entonces podía llamarse “industrias químicas”. Y fue justamente en esta época que ingresaron al país las primeras empresas extranjeras para fabricar agroquímicos y productos fitosanitarios, entre ellas, Du Pont, Rohm-De Haas, Dow Chemical, Bayer y Hoechst, reconocidas hoy como líderes en sector de la industria de procesos químicos a nivel mundial [13].

Considera el doctor Poveda que ese vigoroso crecimiento industrial se debió a un instrumento de política económica que el gobierno de Alberto Lleras Camargo adoptó para el impulso del desarrollo industrial del país. Esa administración eligió estimular el desarrollo de las industrias de bienes intermedios, es decir las que fabrican productos que sirven para fabricar otras manufacturas, a las que los economistas llaman “bienes de consumo final”. Entre los productos que el nuevo gobierno identificó, se encontraban

los productos químicos y petroquímicos, los plásticos artificiales, las fibras textiles sintéticas y el papel. El instrumento de política económica que el gobierno adoptó para estimularlas consistió en establecer una exención del impuesto sobre la renta para las utilidades de las empresas que se dedicaran de manera exclusiva a alguna de estas industrias así elegidas.

En el campo químico-industrial fueron hijos de la Ley 81 de 1960 muchos productos nuevos que antes no se producían en Colombia. Entre ellos estuvieron: papel, pulpa de celulosa, amoníaco, urea, ácido nítrico, nitrato de amonio fertilizante, negro de humo, etileno, polietileno de baja densidad, carburo de calcio, acetileno, cloruro de etileno, resinas de formaldehído, cloruro de polivinilo en suspensión, poliestireno, benceno, tolueno, xilenos, fibras textiles de poliéster, chips de poliéster, anhídrido ftálico, acetato de polivinilo, resinas alquídicas y resinas poliéstericas no saturadas, para no mencionar todos los muchos otros casos [13].

El periodo del decenio de los sesenta lo califica el historiador Poveda como el periodo más dinámico, más fructífero y más exitoso en la historia de la industrialización química del país. Entre las razones con que sustenta su afirmación considera el monto de las inversiones, el número de nuevas empresas, de nuevas fábricas, de nuevas plantas unitarias, de nuevos productos; las tasas de crecimiento de la producción de productos tradicionales y nuevos; la diversidad de sitios geográficos de localización; la formación de eslabonamientos con otras industrias del país; y la variedad de oficios especializados que requirió e implantó en el ámbito nacional.

El ritmo de crecimiento que traía la industria de procesos químicos alcanzó a extenderse hasta los primeros años del decenio de 1970. En esta época se crearon empresas o se montaron algunas plantas nuevas en empresas existentes para producir nuevos productos o productos existentes con nueva tecnología. En Barranquilla se creó la empresa Monómeros Colombo-Venezolanas para producir caprolactama; Interquím se creó

en Medellín para producir metanol, resinas de fenol-formaldehído, de urea-formaldehído y de melamina-formaldehído; Andercol decidió en 1973 adquirir una planta nueva, eficiente, que usara orto-xileno como materia prima para producir anhídrido ftálico y la empresa Carboquímica S.A., en Bogotá, montó otra planta análoga para el mismo producto; Sucromiles instaló dos nuevas plantas para fabricar ácido cítrico y ácido acético; y la compañía Pigmentos y Productos Químicos S.A., en Medellín, inició la producción de pigmentos minerales: amarillos de zinc, amarillos y naranjas de cromo, óxidos y otros pigmentos de cromo, rojos y naranjas de molibdeno, sulfato de cromo, y azules de ultramar. También Ecopetrol se diversificó produciendo las materias primas que son usadas por las industria petroquímicas y entró tímidamente al mundo de los polímeros.

Para los primeros años del decenio de 1970 el boom precedente en el crecimiento de sector de la industria de procesos químicos había terminado.

Durante los 15 años que comenzaron desde mediados de los años setenta, y continuaron a lo largo de los finales de ese decenio y de todo el decenio de los ochenta, especialmente en las industrias químicas y análogas, el crecimiento acelerado que se había registrado en los sesentas pasó a ser apenas una marcha lenta [13].

Pero ya se había logrado un buen desarrollo en este sector. Los escasos proyectos que se adelantaron en forma esporádica se hicieron para fabricar algunos productos de menor mercado que no se elaboraban en el país y muy especialmente para la producción de insumos para la agroindustria, la industria textil, la de curtiembres, la de construcción y otras.

El último gran producto de nuestra industria química que se inició en el país fue el poli-etilentereftalato (PET) rígido, para hacer frascos y botellas. Enka de Colombia montó, alrededor de 1983, dentro de sus instalaciones en Girardota, una planta para su producción. Y la última gran

planta química que se construyó en el país en el siglo XX fue la planta de Polipropileno de Colombia, Propilco, en 1991; en la que se produce polipropileno en chips, polimerizando propileno importado.

El decenio de los años noventa fue de estancamiento, clausura de empresas, abandono de producciones y ninguna diversificación de productos. Muchas fábricas dejaron de producir uno o varios de sus productos —o todos ellos— para dedicarse a importarlos. En 1998, 1999 y 2000, casi sin excepción, la producción nacional de cada producto o material de este sector mermaron pronunciadamente. Fue un periodo de estancamiento inicialmente, y luego de depresión, no sólo para la industria de procesos químicos sino para todos los sectores industriales reunidos, y para la economía general del país, afirma Poveda.

La evolución de la industria de procesos químicos en Colombia, que arranca prácticamente en el decenio de 1940 y tuvo su mayor tasa de crecimiento en los 1960 y 1970, siguió un patrón concurrente, en su dinámica, con el despliegue de la cuarta revolución tecnológica y con el desarrollo mundial de esta industria. Hoy este sector industrial, y como todos los otros en Colombia, vive una crisis no sólo derivada del proceso de transición de un paradigma tecnoeconómico a otro, sino también de su exposición a la competencia internacional como resultado del abandono de algunas políticas de protección.

Posibilidades de innovación en Colombia

La industria de procesos químicos en Colombia no sólo tiene posibilidades de realizar cambios tecnológicos en los procesos y los productos que elabora hoy, utilizando tecnologías modernas disponibles en el mercado internacional de tecnología, sino que también puede introducir innovaciones con sus propios recursos. Esas innovaciones deben buscarse en los campos que constituyen hoy retos y problemas globales para esta industria, pero restringida a ciertas áreas

estratégicas para el desarrollo industrial del país, teniendo en cuenta las condiciones del mercado local y perspectivas de exportación así como la disponibilidad de capital e integración con otras industrias en la cadena productiva. Pero también las innovaciones pueden explorarse para aprovechar recursos naturales disponibles y abundantes para agregarles valor o para generar nuestra propia tecnología allí donde haya oportunidades.

Al igual que la industria mundial de procesos químicos, la nacional podría, con algunas limitaciones, incursionar en el desarrollo de nuevos productos y materiales para sustituir los productos contaminantes, los productos peligrosos para la salud humana o los productos de bajo desempeño en sus aplicaciones; o también en el desarrollo de nuevos productos con propiedades y características especiales demandados por tecnologías emergentes como: los materiales inteligentes, o materiales de vida programada autodegradables o biodegradables y los superconductores entre múltiples opciones.

Es en las sustancias especiales donde el país tiene un gran filón para las innovaciones si se aprovecha la biodiversidad —un banco que guarda un tesoro inexplorado— como su fuente o como modelo para el desarrollo de bioprocesos para la elaboración de estos productos de alto valor agregado. Este debería ser un blanco estratégico para obtener particularmente agentes activos de drogas, catalizadores, fragancias, esencias, saborizantes, colorantes, pigmentos, edulcorantes, insecticidas, herbicidas, fungicidas, parasiticidas, esteroides, hormonas, antibióticos, enzimas, pectinas, vitaminas y un sinnúmero de productos con desempeños muy específicos y usos sofisticados. Pero aún en los materiales y sustancias de uso masivo podrían buscarse también nuevas aplicaciones o usos.

Quizás son los procesos de producción el espacio más rico en posibilidades de innovaciones. Estas oportunidades de innovación en los procesos de fabricación abarcan: el desarrollo de procesos más amigables ambientalmente y aceptables socialmente; procesos más eficientes en

términos de rendimientos en productos y consumo de energía; procesos que incorporen innovaciones en operaciones unitarias y en reactores; procesos que utilicen nuevas materias primas y de más baja calidad; nuevos procesos que usen materias primas disponibles e inexploradas; nuevos procesos con unidades híbridas como la destilación reactiva, membrana catalítica, extracción líquido-líquido reactiva; y procesos integrados en plantas flexibles multiproductos.

En el campo de los procesos de fabricación más amigables ambientalmente y aceptables socialmente, se pueden desarrollar procesos para reemplazar aquellos que generan efluentes contaminantes, y aun para elaborar sustancias y materiales inocuos ambientalmente. Estas innovaciones pueden explorarse con procesos que usen rutas químicas diferentes a las convencionales o con el desarrollo de catalizadores muy selectivos que eliminen reacciones colaterales o en serie, indeseables, y generadoras de sustancias nocivas o peligrosas para el ambiente. Otra alternativa que puede contemplarse es la búsqueda o desarrollo de procesos que conviertan los materiales o sustancias indeseables en sustancias inocuas, pero preferencialmente en materiales no desechos que tengan utilidad y demanda en el mercado; o innovaciones en procesos que generen subproductos que puedan entrar en las cadenas productivas o que generen sustancias que se puedan manejar y disponer de forma segura.

En la búsqueda de procesos que utilicen nuevas materias primas, el país debe seriamente considerar el carbón y el gas natural, así como la biomasa como nuevas fuentes de materias primas para reemplazar el petróleo que ha predominado en los últimos cincuenta años en la industria de procesos químicos. Pero también explorar procesos que aprovechen minerales de cobre, estaño, plomo, zinc, manganeso y otros no metálicos para la fabricación de óxidos, sales, y aun catalizadores metálicos y cerámicos. La biodiversidad y la abundancia de radiación solar, como ventajas comparativas, ofrecen una fuente variada, permanente e inagotable, de sustan-

cias químicas. De estas fuentes pueden extraerse productos químicos especiales de alto valor agregado, como el caso del edulcorante esteviólico extraído de la estevia, la cortisona e insecticidas biodegradables que pueden obtenerse del fique, carboximetilcelulosa y sorbitol de la caña de azúcar, esencias, fragancias, colorantes, fungicidas, pesticidas, y un sinnúmero de productos que aún desconocemos por vacíos de conocimiento de la fitoquímica de nuestra flora.

Convertir el carbón, el gas natural, la caña de azúcar, los vástagos del plátano y el banano, la cascarilla de arroz, el follaje de los cultivos de banano, de maíz, de arroz y de otros cultivos, el bagazo de la caña de azúcar, los desechos de cultivos intensivos, la sal marina, bauxitas, calizas, el azufre y la roca fosfórica, y otros recursos naturales en materias primas de la industria de procesos químicos, le daría a Colombia la posibilidad de construir un sector industrial más integrado en sus cadenas productivas, agregar valor a estos recursos, diversificar sus exportaciones y minimizar las importaciones de químicos.

Con el carbón se obtendría benceno, tolueno, xilenos, fenol, naftaleno, antraceno, anilina y otros derivados de la carboquímica. El amoníaco y la urea podrían producirse a partir de gas natural, así como ácido nítrico, nitrato de amonio, nitroglicerina, etilen-glicol, ácido oxálico y ácido fórmico, metanol y trinitrotolueno. Toda la gama de productos clorados, con una demanda importante en los ámbitos local y mundial, se derivarían del uso de una cadena productiva que se eslabone a partir del proceso electrolítico con celdas de diafragmas o de membranas. Ese complejo industrial pondría en el mercado ácido clorhídrico, cloruro de vinilo, tetracloro-etileno, cloruro férrico, ácidos monocloro-acético y tricloro-acético, tetracloro-etileno, hipocloritos de sodio y de calcio, monocloro-benceno y dicloro-benceno, pentaclorofenol, cloroparafinas plastificantes, monocloro-etileno. Y el follaje de las plantas, que hoy se pierde en los cultivos,

permitiría enriquecer la oferta de proteínas con precios muy bajos [13].

Los bioprocesos son alternativas que ofrecen innumerables posibilidades para el desarrollo de innovaciones en la industria de procesos químicos en Colombia, no sólo para explorar procesos industriales sustitutos de los procesos conocidos de transformaciones fisicoquímicas para elaborar sustancias químicas básicas, productos intermedios, o de uso final que son commodities, sino que tienen un potencial especial para obtener químicos especiales. En la sustitución de los procesos fisicoquímicos tradicionales tienen la ventaja de que podrían generar procesos que no requieren condiciones extremas de presión y temperatura, lo cual se traduciría en ahorros significativos de energía, pero también en ahorros importantes en inversión de capital por los costos de los equipos que serían más baratos. En estos procesos se usarían organismos, o partes de ellos, para explotar sus procesos metabólicos naturales o transformaciones de estos organismos y de sus procesos, mediante los avances que se produzcan en la ingeniería genética, para que sobreproduzcan una sustancia que elaboran naturalmente o para que generen una sustancia deseada de acuerdo con las manipulaciones genéticas que se realicen. Es el caso de la utilización de bacterias para la producción de colorantes termosensibles, síntesis de hidrocarburos utilizando microalgas de agua dulce como la *Botryococcus braunii*, o la producción de polímeros biodegradables como el polihidroxibutilato con modificaciones genéticas de células *E. coli*, ya mencionada.

Las innovaciones en los procesos de manufactura pueden realizarse usando las tecnologías convencionales en las operaciones unitarias y los procesos unitarios, pero deben también considerar las innovaciones que en el ámbito mundial se están introduciendo en esas unidades básicas de transformación buscando ahorros energéticos, funciones más especializadas, procesos más limpios, equipos polifuncionales y más flexibles, y

plantas más seguras y eficientes. No pueden excluirse de esa búsqueda las operaciones híbridas, los microrreactores con geometrías no convencionales, las operaciones de separación con transferencia de masa intrafacial como las separaciones con membranas y la separación con tamices moleculares.

La tecnología microelectrónica y la informática ofrecen muchas posibilidades de innovación en las empresas colombianas del sector de procesos químicos. Esas posibilidades inundan todas las actividades de la cadena de valor, desde la identificación de las mismas oportunidades de mercado o tecnológicas, hasta la relación con usuarios y proveedores. La investigación, desarrollo, diseño, optimización, de productos, de procesos, de equipos y plantas, la operación y el control de equipos y plantas, y los procesos de gestión, pueden ser altamente mejorados utilizando herramientas informáticas y tecnología microelectrónica. La simulación molecular, la simulación dinámica, los sistemas expertos y aun el *software* convencional pueden ser usados para mejorar el desempeño de todas las actividades antes señaladas; y tienen un valor estratégico si se utilizan en la generación de tecnologías apropiadas para estos países; especialmente en el aprovechamiento de las materias primas nacionales y en el diseño de plantas discontinuas multipropósitos. Es quizás en el área del diseño de los equipos y plantas multiproductos donde aparecen las mejores oportunidades de innovación, particularmente para la manufactura de químicos especiales y para enfrentar el problema de economía de escala, lógica dominante en las capacidades de plantas de este sector en el ámbito mundial en la producción de commodities.

En el mercado nuestra industria de procesos químicos debe integrarse en clusters, dentro del mismo sector y con otros sectores industriales, pero también pensar en el mercado mundial con productos competitivos en precio y desempeño. Si se tiene un producto que satisface requisitos de calidad en mercados globales, el tamaño del

mercado local no sería obstáculo para producir químicos básicos o productos intermedios.

También las empresas del sector de la industria de procesos químicos en Colombia podrán introducir innovaciones en su estructura y organización, en los procesos de trabajo y los procesos de gestión, además de los señalados en los procesos de manufactura. Esos cambios, generados mediante programas de mejoramiento continuo o innovaciones radicales, buscarían transformar la empresa para adaptarla al nuevo paradigma socioproductivo que está emergiendo desde comienzos de los años setenta y que se difunde como respuesta de la crisis del taylorismo y el fordismo. Las empresas colombianas en esta industria deberían explorar el cambio hacia unas organizaciones menos jerarquizadas y más horizontales para mejorar los procesos de comunicación interna y externa, así como los procesos de aprendizaje; y buscar su integración en redes productivas, aun con empresas multinacionales del sector.

¿Cómo abordar estas oportunidades de innovación y convertirlas en proyectos reales que transformen la industria de procesos químicos en Colombia? Es un asunto de cambio de cultura en las empresas y de política de desarrollo industrial en el país.

La gestión de la innovación en las organizaciones en sí es riesgosa e incierta. No basta con el reconocimiento de las oportunidades e identificación de las posibles competencias necesarias y requerimientos de condiciones del entorno para su éxito. Ella no es sólo el resultado de esfuerzos y de una buena gestión del proceso de investigación y desarrollo. Mejores procesos de gestión pueden aumentar la eficiencia y la productividad de la innovación tecnológica, pero es muy probable que no generen productos efectivos y por lo tanto no garanticen éxito comercial y financiero (Tidd, 1997).

Tampoco bastan las competencias en mercadeo. Aún la más completa investigación de mercado

puede fracasar en la identificación de potenciales productos y servicios completamente nuevos. Y no es garantía la mera transformación de estructuras organizacionales. Estructuras planas y procesos administrativos diligentes pueden mejorar la eficiencia en la atención de los clientes y entregas oportunas de productos, pero no necesariamente en la entrega de innovaciones en productos y servicios. Todo esto sugiere que no es suficiente el enfoque unidimensional de la innovación. Se requiere un enfoque integrativo en su gestión, en el que el mercado y el Estado desempeñen papeles complementarios. Para lograr mejores resultados, debería establecerse entre ellos mecanismos de intercambio de información, coordinación, cooperación y una clara definición de la intervención del Estado para corregir las fallas del mercado (Neffa, 2000) “La búsqueda es un proceso sistemático de aprendizaje y cambio organizacional que compromete la cultura, la estructura, los procesos y muchas rutinas mediante las cuales la organización identifica problemas y ensaya soluciones apropiadas” (Tidd, 1997).

Finalmente, es inaplazable la clara política de desarrollo industrial de este sector y el cambio en la cultura empresarial para incorporar de forma deliberada y organizada los procesos de gestión tecnológica y de manera prioritaria sistemas para la gestión del conocimiento y la gestión de la innovación. Son clave en estos sistemas de gestión los procesos de gestión de información y los procesos de toma de decisiones, así como una nueva lógica en la organización del trabajo, para construir una inteligencia corporativa en la empresa. En estos campos más que innovaciones deberían introducirse cambios en la cultura —valores y comportamientos— facilitados con las tecnologías informáticas y con una lógica de gestión de acuerdo con el nuevo paradigma en difusión.

Referencias

1. Bhagat, Phiz, “An introduction to neural nets”. *Chemical Engineering Progress*. August, 1990.
2. Crowe, Edward R., Vassiliadis, A. “Artificial Intelligence: Starting to realize its practical promise”. *Chemical Engineering Progress*. January, 1995.
3. Chenier, P., J. *Survey of industrial Chemistry*. 2nd Revised Edition. VCH Publisher Inc. New York, 1992.
4. Chohey, N.P., Ondrey, G., Parkinson, G., “Microreactors find new niches”. *Chemical Engineering*. March, 1997.
5. Díaz, Manuel. “La ingeniería química en los albores del siglo XXI”. *Ingeniería Química*. No. 344. Marzo, 1998.
6. Drucker, P. *La innovación y el empresariado innovador: La práctica y los principios*. Editorial Norma. Bogotá, 1986. Gervasio G.J., Pelletier M.J. “Monitor with improved Raman spectroscopy”. *Chemical Engineering*. February, 1997.
7. Heaton, A. (Editor). *The Chemical Industry*. Blackie Academic & Professional. London, 1994.
8. Koch, David H. “The future: Benefiting from new tools, techniques, and teaching”. *Chemical Engineering Progress*. January, 1997.
9. Lagowski, J.J. “Viewpoints: Chemist on Chemistry. Chemical Education: Past, Present and Future”. *Journal of Chemical Education*. Vol. 75, No. 4. April, 1998.
10. Neffa, J.C. *Las innovaciones científicas y tecnológicas. Una introducción a su economía política*. Editorial Lumen/hVmanitas. Buenos Aires, 2000.
11. Ondrey Gerald, Kim Irene, Parkinson Gerald. “Reactors for 21st century”, *Chemical Engineering*. June, 1996.
12. Plásticos Universales. “Cuando el caucho se convirtió en goma. Historia de un asunto pegajoso”. <http://www.plastunivers.es/pu/59/R59PNcauchgoma.htm>.
13. Poveda, G. *La química en Colombia. Ciencia, ingeniería, industria e historia*, en edición, Medellín, noviembre de 2001.
14. Reuben, B.G., Burstall, M.L. *The Chemical economy*. Longman Group Limited. London, 1973.
15. Shinnar, Reuel, “The future of Chemical Engineering”. *Chemical Engineering Progress*. September, 1991.

16. Sander, John H. "Chemical Engineering in the 80s: Turning problems into opportunities". *Chemical Engineering Progress*. February, 1981.
17. Shanley, Agnes. "Molecular modeling it's not just for chemist anymore". *Chemical Engineering*. January, 1996.
18. Shinnar, Reuel. "The future of the chemical industries". *Chemtech*. January, 1991.
19. Tidd, J., Bessant, J., Pavitt, K. *Managing innovation. Integrating technological, market and organizational change*. John Wiley & Sons. New York, 1997.
20. www.pafko.com.