

# INGENIERIA E INDUSTRIA QUIMICA<sup>1</sup>: ¿HACIA DONDE VAMOS?

Carlos Alberto Garzón Gaitán,  
Msc. Pedagogía de la Tecnología. UPN.  
Profesor Asistente  
Universidad Nacional de Colombia.

---

Conocer a fondo las fuerzas del cambio, diferenciar la tecnología medular de la periférica, preveer con certeza, modelar el futuro y actuar junto con los mas capacitados y audaces. Todas estas pueden ser proclamas cuya convergencia ayude a hacer realidad la utopía de un mañana mas equitativo para los colombianos.

El presente artículo tiene tres partes: una descripción muy simple del escenario actual de la ingeniería química, una prefiguración del escenario ideal y, finalmente, unas estrategias para orientar la acción de los ingenieros químicos con el fin de alcanzar el escenario ideal.

## ESCENARIO ACTUAL DE LA INGENIERIA QUIMICA

Hacer una descripción minuciosa de los sectores industriales en los que trabajan los

ingenieros químicos se sale de los objetivos de este artículo. Solamente se describirán algunos tópicos de la industria química en los Estados Unidos, para tener un marco de referencia cercano y un breve análisis de la dinámica reciente de la industria química en Colombia.

---

*1 A los 107 años de existencia se propone ampliar la definición oficialmente aceptada de la siguiente manera Ingeniería Química puede definirse como la generación y aplicación de conocimientos y medios de las ciencias físicas, químicas, biológicas, de las matemáticas y de las Ingenierías, en el análisis, administración, dirección, mejora continua, innovación, supervisión y control de procesos en los cuales ocurren cambios físicos, químicos y bioquímicos para transformar materias primas en productos elaborados o semielaborados, con excepción de los químicos farmacéuticos, así como el diseño, construcción, montaje de plantas y equipos para estos procesos, su optimización y mejora, en toda entidad, universidad, laboratorio o instituto de investigación que demande o genere esos conocimientos y medios<sup>2</sup>.*

## **LA INDUSTRIA QUIMICA EN ESTADOS UNIDOS<sup>2</sup>**

La industria química en Estados Unidos vendió en 1990 doscientos cuarenta y ocho billones de dólares, generaba ochocientos cincuenta mil empleos, de los cuales cuatrocientos ochenta y cuatro mil eran trabajadores directos, elaboraba unos cincuenta mil productos diferentes y esperaba crecer en los siguientes años a una tasa anual del 1.5% anual.

Los subsectores más dinámicos en el sector químico norteamericano son el farmacéutico, en el cual se prevén crecimientos del 5% anual, y el de adhesivos y sellantes.

Se espera que la industria química norteamericana invierta cerca a 2.6 billones de dólares en el área ambiental, en este sector, lo cual representa cerca del 12% del total de las inversiones en nuevas plantas.

Los gastos de I&D se están enfocando principalmente hacia nuevos procesos de manufactura más que hacia el desarrollo de nuevos productos.

### **Productos químicos orgánicos.**

Las ventas en este subsector representaron 101 billones de dólares en 1993, siendo los principales productos el etileno, el metanol, polipropileno, butadieno, benceno, tolueno y xileno los cuales representan el 70% del mercado mundial.

Entre el 75% y el 80% de los productos químicos orgánicos, medidos en volumen, son derivados de la petroquímica el resto son productos farmacéuticos o drogas; los cuales representan en valor cerca del 50% del total.

Las inversiones en este subsector se orientan principalmente al diseño de nuevos procesos para hacer que las tasas de retorno de la

inversión sean más altas y que los procesos sean más eficaces y limpios.

### **Productos químicos inorgánicos**

Los productos químicos inorgánicos representan el 10% de las ventas de productos químicos en USA (24 billones de dólares), la demanda por estos productos esta muy relacionada con el comportamiento del PIB y con las industrias relacionadas con el hogar, la industria automotriz, la industria del papel y la agricultura. Algunos productos de este sector tendrán una demanda superior a la tasa de crecimiento promedio de la producción, entre los cuales se cuentan los derivados del sodio como el clorato de sodio, el cual está reemplazando el fosfato de sodio que es usado como blanqueador en la industria del papel y en la industria de jabones y detergentes. La demanda de peróxido de hidrogeno también aumentara por los mismos motivos lo mismo que la de los gases industriales, los cuales están siendo producidos empleando nuevas tecnologías.

### **Alcalis y cloruros**

Aquí están incluidos el cloro, la soda cáustica, la soda ash, el bicarbonato de sodio, el hidróxido de potasio, y el carbonato de potasio.

La producción de cloro se ha visto afectada por las restricciones impuestas a nivel mundial para el uso de clorofluorocarbonos (CFC)s, los mercados de cloruros de monómeros vinílicos (VCM), del cloruro de polivinilo (PVC) y el dicloruro de etileno (EDC) también están siendo afectados por las restricciones que se están colocando a la disposición del PVC.

Esto no quiere decir que el mercado de los CFC's haya desaparecido. El Servicio de Investigaciones del Congreso de los Estados Unidos reporta una demanda proyectada para 1996 de doce millones de libras de CFC's para refrigeradores comerciales, ocho millones para enfriadores comerciales, tres millones para refrigeradores industriales y cincuenta millones de libras para automóviles. (en 1992 se comercializaron 1.2 billones de libras por US\$ 1.5

---

<sup>2</sup> La información contenida en este capítulo es tomada del documento "The industrial Outlook" 94, del Boletín Económico del Departamento de Comercio de los Estados Unidos".

billones de dólares, mientras que en 1993 se vendieron US\$ 2.4 billones).

Las perspectivas de este sector dependerán, en gran parte, de las regulaciones ambientales. La relación cíclica que existe entre la producción de la soda y el cloro se verá afectada notoriamente por la gran cantidad de soda ash que se está encontrando de forma natural con purezas aceptables a nivel industrial.

### **Gases industriales**

Las ventas de este subsector alcanzan 2.8 billones de dólares y crecerán a cerca del 3% anual, tasa superior al promedio del sector, se incluye la producción de Oxígeno, Nitrógeno, Hidrógeno, Acetileno, dióxido de carbono, Argón, Helio, y otros cien gases especiales.

Dos nuevas tecnologías están emergiendo para la producción de gases industriales: Pressure Swing Absorption (PSA) y las membranas semipermeables, las cuales están siendo empleadas para la producción de Oxígeno, Nitrógeno, dióxido de carbono, Metano e Hidrógeno.

Estas nuevas tecnologías son dominadas por cuatro grandes firmas norteamericanas y han permitido reducir los costos de producción considerablemente haciendo mas difícil la supervivencia de las firmas que siguen produciendo con tecnologías tradicionales.

### **Otros productos químicos industriales inorgánicos (NEP)**

Las ventas de este subsector representan 11.7 billones de dólares y están creciendo a una tasa del 3% anual; incluye la producción de los ácidos sulfúrico, clorhídrico, fluorhídrico, sales de aluminio, potasio, sodio, catalizadores, fosfato de calcio, carbón activado, peróxido de hidrogeno, fósforo elemental y sulfuro de fósforo recuperado.

### **Pinturas y recubrimientos**

Este subsector esta siendo muy presionado para que reduzca la emisión de compuestos

orgánicos volátiles (VOC); por lo tanto, se está produciendo una reformulación masiva de líneas completas de productos para incorporar solventes de baja toxicidad y estimulando el uso de pinturas solubles en agua.

### **Adhesivos y Sellantes**

Estas dos categorías cubren productos químicos similares pero que poseen funciones completamente diferentes: Los adhesivos se usan para unir o enlazar dos materiales diferentes, mientras que los sellantes se usan principalmente para crear una barrera protectora contra condiciones ambientales adversas o productos químicos agresivos. Se esta viendo promisorio el empleo de adhesivos solubles en agua y de aquellos que se curan por medio del ultravioleta. será considerable la demanda por adhesivos impermeables, sensibles a la presión y para aplicaciones estructurales, lo mismo que para aquellos adhesivos que tienen aplicaciones medicas y odontológicas.

### **Pesticidas**

EUA vende 7.6 billones de dólares en pesticidas, el mercado mundial se estima en 25 billones de dólares, este subsector crece a una tasa del 1% anual.

El 95% de los ingredientes activos de los pesticidas son productos químicos orgánicos, su producción esta siendo afectada fuertemente por restricciones ambientales elevando los costos de investigación y desarrollo a mas de US\$ 50 millones por cada nuevo pesticida contra US\$ 6 millones que costaba hacerlo en 1976 y alargando el tiempo de desarrollo a cerca de nueve años. Es de esperarse que, movidos por estas presiones, crezca el mercado de biopesticidas.

### **MEDIO AMBIENTE: LA GRAN FUERZA DEL CAMBIO**

Como puede deducirse de lo anteriormente planteado las presiones por un ambiente más limpio están desatando un gran movimiento de cambio que está afectando la naturaleza misma de los productos y de los procesos de la industria química y en general de toda la actividad

productora, revolcando los viejos paradigmas técnico-económicos de economía de escala, de predominio de las utilidades sobre el desarrollo sostenible, de productividad sin desarrollo, abriendo nuevos caminos para la actividad profesional de los ingenieros y nuevas formas de evaluar la bondad de los proyectos de inversión.

Según Blumenberg (1992)<sup>3</sup> los cambios en el medio ambiente industrial necesitan procesos constantes de adaptación y el desarrollo de nuevos procesos o nuevas rutas de síntesis. La innovación en procesos es un reto perpetuo, especialmente para aquellas compañías que producen productos químicos básicos o intermedios a gran escala. Los factores económicos determinan la estrategia y la tecnología de la industria química obligándonos a usar moléculas simples y económicas como materia prima y a optimizar los parámetros críticos del proceso como son, por ejemplo, los catalizadores, la temperatura y la presión.

Al mismo tiempo la investigación en la academia con el concurso de disciplinas especializadas se convierte en una herramienta indispensable para la industria y presiona con frecuencia los procesos de innovación. En nuestros días es imperativo el uso del trabajo interdisciplinario como un requisito para los procesos de investigación exitosos. La aplicación de los principios de la ingeniería de reacción química genera soluciones innovadoras en el desarrollo, escalado y optimización de los procesos químicos.

Cada ventaja en los materiales, energética, tecnológica o ecológica en la síntesis a gran escala se propaga por la vía de un intrincado conjunto de pasos en los procesos químicos a través de la venta de productos. Cada innovación impulsa y promueve la producción económica, expande, por lo tanto el espectro de aplicaciones e incrementa la demanda. Las capacidades resultantes son casi siempre mayores que las de las generaciones de las plantas que las

precedieron. No hay prácticamente espacio para la innovación de productos en esta área, pero la innovación en procesos se está convirtiendo en el factor decisivo del éxito en la industria química moderna. La optimización continua y sistemática de los inventarios de materia prima, del consumo de energía, del desempeño de los productos, de las medidas de seguridad, de la inexistencia o reutilización de desperdicios, de la flexibilidad de producto, de la calidad y del control de polución son medidas necesarias para mejorar la productividad de los procesos.

### LA INDUSTRIA QUIMICA EN COLOMBIA

Las cifras aquí contenidas se refieren al conjunto de subsectores que aparecen relacionados en la Tabla No.2 y, como puede verse allí, no solamente se incluyen los sectores 351 y 352 sino todos aquellos en los cuales se desempeñan los ingenieros químicos. Cualquier comparación con las cifras relacionadas con la industria norteamericana las cuales aparecen en la primera parte, debe hacerse con precaución.

En el siguiente cuadro puede verse que en Colombia existen mas de 1900 establecimientos, en los cuales trabajan directamente cerca de 190.000 personas, empresas que reportaron una producción bruta superior a los (\$40.000.000.000.000) cuarenta billones de pesos constantes de 1990.

Tabla No.1

AÑO	ESTABLECIMIENTOS	PERSONAL OCUPADO
1986	1657	175233
1987	1749	184087
1988	1805	180556
1989	1925	183963
1990	1938	186971

El sector 352 presenta más valor agregado que el 351 pero a su vez el sector 352 se encuentra mas protegido, desde el punto de vista del arancel promedio ponderado (10%), que el sector 351 (6%).

<sup>3</sup> Blumenberg, B. *Chemical Reaction Engineering in Today's Industrial Environment, Chemical Engineering Science. Vol. 47, No. 9-11, pp 2149-2162, 1992.*

En cuanto a los cambios en eficiencia presentados entre 1978 y 1991 los sectores 351 y 352 presentaron tasas anuales de crecimiento positivas pero menores al 0.25% anual casi siete veces menor que la presentada por el sector alimentos el más dinámico en eficiencia.

Desde el punto de vista de la eficiencia relativa, es decir, la relación entre el nivel de eficiencia promedio del sector (ponderada por la producción bruta a nivel de firma) y el nivel de eficiencia de las empresas más eficientes del sector en el período 1990-1991, estas eran de 77.2% para el sector 351 y de 71.8% para el sector 352.

Desde el punto de vista de la dinámica exportadora evaluada entre 1991 y 1993 el sector 351 aumento en un 23.6% en dólares corrientes y participó en un 16.6% en el crecimiento de las exportaciones industriales; mientras que el sector 352 aumento en el 40.6% sus exportaciones en dólares corrientes pero sólo participó en un 4.8% en el crecimiento de las exportaciones. (La contribución al crecimiento de las exportaciones fue negativa para el sector textil en este mismo período).

### **Eficiencia de la industria en Colombia, por sectores**

“El sector con mayor crecimiento en la eficiencia promedio fue la industria de la madera (CIU 331), con una tasa de crecimiento anual de 1.34%, luego alimentos (311-312) con 1.10%. El de menor crecimiento fue el sector productor de equipo y material de transporte (384) con -0.61%.”

Existe una gran diversidad en la evolución del grado de eficiencia promedio durante el período. Sin embargo hay algunos patrones comunes a un conjunto de sectores:

- a) **Eficiencia en “U”**. Se observa una caída en la eficiencia promedio en los primeros años de la década de los ochenta, seguida de una recuperación posterior. Este comportamiento en “U” de la eficiencia es especialmente marcado en papel (341), químicos (351-352), plásticos (356), metales

no ferrosos (372) y fabricación de maquinaria (382-383).

- b) **Eficiencia en “U invertido”**. Algunos sectores tuvieron una evolución opuesta de la eficiencia promedio. Esta se incrementó durante finales de los setenta y principios de los ochenta y, decreció posteriormente. Este fue el caso de la fabricación de vidrio (362), otros minerales no metálicos (369) y productos metálicos (381).
- c) **Eficiencia decreciente**. Para varios sectores la tasa de eficiencia promedio disminuyó en forma continua durante el período. El caso más significativo es el de equipo de transporte (384), cuyo nivel de eficiencia disminuyó 8.5% entre 1978 y 1989. Los otros casos fueron caucho (3.55%, con una caída de 3.5%) y cuero (323, con una caída de 2.9%).
- d) **Eficiencia creciente**. Finalmente, en algunos sectores la tasa de eficiencia relativa creció en forma continua durante todo el periodo.

El caso más sobresaliente es el de la industria de la madera (331), con un crecimiento cercano al 20% entre 1978 y 1991, prendas de vestir (322, con un incremento de 9.3%), y fabricación de muebles (332, con una tasa del 9%), otros sectores con un comportamiento similar son industrias básicas de hierro y acero (371), con un incremento en la eficiencia promedio de 9.2%; manufacturas diversas (395, con una tasa de crecimiento cercana al 7%) y fabricación de equipo profesional (385, con un incremento de 5.3% durante el periodo.

### **EL ESCENARIO IDEAL: LA UTOPIA**

Colombia requiere definir una estrategia de desarrollo clara, consistente y viable de largo plazo. Existen dos escenarios: el actual (7) y el ideal proyectado(8). Para alcanzar el escenario ideal se hará énfasis en la parte final del documento, sobre la importancia de definir unas prioridades estratégicas como país, la necesidad del dominio de conocimientos especializados

**TABLA No.2**  
**PRODUCCION BRUTA<sup>4</sup>**  
(Miles de pesos constantes de 1970)

SECTOR	1980	1985	1990
311	7301274	8427013	10738533
312	3578851	4095376	6520533
313	8996561	11399657	10895032
321	3031478	1239170	1650312
323	700321	634841	894685
341	1769712	2592968	2278273
351	4678814	6262107	10906399
352	7235698	8982672	11379271
353	3639186	3607054	3214221
354	233477	334961	373903
355	168357	2013144	2136645
356	1927116	2253296	3060007
361	387654	498715	595544
362	798357	935105	1134748
369	1085953	1501918	1955023
371	2299289	2992085	4297163

relacionados con ellas, la necesidad de agregar valor a nuestros productos de exportación, sobre la importancia del dominio del conocimiento tecnológico en áreas claves, la formación del capital humano y la interacción dinámica entre ciencia-ingeniería y gerencia, entre otras.

### Una mirada panorámica

En los años 70 la fuerza para la innovación fue la necesidad de reducir el consumo de energía inducidos por la crisis del petróleo. Las investigaciones se concentraron en la recuperación integral del calor y revivieron las investigaciones sobre la química del carbón, y por ejemplo, los procesos de producción sintéticos de

gas natural. Estos aspectos fueron menos importantes en los ochenta.

La tecnología del uso eficiente de la energía esta llegando a sus límites económicos. Otros factores fueron también importantes como el control de calidad y la flexibilidad en la producción, prioridades determinadas por el mercado. La seguridad jugaba ya un rol importante en los setenta, pero era una preocupación centrada en los procedimientos de operación de las plantas, evitar los productos químicos tóxicos y la seguridad inherente al proceso.

Las medidas de control de polución se hicieron importantes en los setenta, el énfasis se colocó en primer lugar en el tratamiento de aguas residuales, mientras que en los ochenta evolucionó hacia el control de la polución del aire. Las investigaciones sobre reciclaje y el desarrollo de procesos limpios están hoy en auge.

<sup>4</sup> Machado, C. y Avendano, L. "Estudio preliminar de indicadores económicos y técnicos sobre la Industria Química en Colombia", Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C.,.

Según Ertl (1991) los retos del presente y del futuro son paradójicamente volver a los fundamentos para repensar el pasado y replantear la metodología científica: dejar el empirismo y ser más estratégicos, entender ahora si los principios científicos de la termodinámica, la cinética de reacción, y los mecanismos de la catálisis.

Aunque el panorama es sombrío para las nuevas inversiones en Colombia es inevitable hacerlas. Algunas plantas requerirán cambio total en la tecnología medular, otras mejoras substanciales en nuevas tecnologías o en tecnologías tradicionales y otras en tecnologías no medulares.

La ingeniería de proyectos y alguna labor de investigación por parte de centros sectoriales especializados o de departamentos de I&D de las empresas será necesaria, demandando más recursos humanos capacitados a alto nivel.

### **La ingeniería de la reacción química**

Sin lugar a dudas, las nuevas tendencias tecnológicas y de mercado están tocando la medula de la ingeniería química.

Los cambios en la ingeniería de las reacciones químicas están siendo determinados por varias prioridades las cuales pueden ser clasificadas como de mercado (eficacia, selectividad, costo mínimo, nuevos productos); optimización de inventarios, seguridad en el proceso y en el manejo de productos y, control de polución (cero residuos).

Esta presión por los cambios está generando nuevos retos:

- a) Manejar los fundamentos de la reacción química para controlar el equilibrio termodinámico, ser más selectivos en las condiciones de operación y en la selección de los catalizadores que favorezcan la producción de aquellos productos que más se consumen o que son más rentables.
- b) La integración de las operaciones de reacción y separación en un sistema

reactor-catalizado simple ilustra una interesante y promisoría innovación en los procesos químicos (Reactores multifuncionales o procesos de destilación reactiva).

- c) La realización técnica de procesos biotecnológicos basados en la manipulación genética de microorganismos como el primer paso en la comercialización de innovaciones en biotecnología. Tales procesos biotecnológicos requieren técnicas sofisticadas de separación de pequeñas cantidades de producto desde un medio de reacción de gran masa y grandes exigencias de limpieza y seguridad.
- d) El manejo de la tecnología de las cerámicas avanzadas por procesos de fabricación en serie para soporte de nuevos sistemas de catalizadores será también un requisito para la optimización de procesos de producción más efectivos y eficientes. Por otro lado, será necesario optimizar los procesos de producción de cerámicas avanzadas para usos en electrónica, cerámicas para la construcción de equipos que operan a altas temperaturas y membranas de ultrafiltración.
- e) Cambio en la naturaleza del control de calidad. En la actualidad el control de la calidad en la producción química está centrado en el proceso, especialmente en las operaciones de separación, el objetivo futuro será el de asegurar la calidad de los productos controlando la reacción química que los genera, la ingeniería de la reacción química será la respuesta apropiada a este nuevo reto.
- f) Los productos químicos básicos (“los intermedios inmortales”) seguirán siendo los mismos (300, aproximadamente) lo que cambiara sustancialmente serán los procesos para su producción, un gran campo de acción para los ingenieros de procesos en el diseño de procesos está ganando un nuevo auge, así, la mejor actitud en el futuro será considerar como

obsoletos todos los procesos existentes hoy en día; dado que siempre existirá una posibilidad de mejora replanteando los propios fundamentos. (nuevos procesos de síntesis, nuevos catalizadores, nuevas condiciones de reacción, nuevos métodos de separación).

- g) El diseño de reactores mas eficientes será otra vía alterna de optimización y mejora de procesos.
- h) La protección del medio ambiente controlando la polución de manera integrada al proceso, es decir evitando el uso o la producción de sustancias peligrosas, encontrando nuevas rutas de producción y de síntesis, como por ejemplo, el proceso de producción del metilmetacrilato desarrollado por la BASF que evita el uso de cianuro, acetona, cianhidrina.

## Investigación en ingeniería química<sup>5</sup>

El objetivo de la investigación básica en ingeniería química es el desarrollo de conceptos y métodos para entender mejor y diseñar procesos en los cuales materias primas y energía son transformados en productos exitosos.

La investigación aplicada por supuesto estará colocada en medio entre la ciencia básica y las necesidades humanas que los productos en el mercado pretenden satisfacer.

Este es realmente el corazón de la ingeniería química: dominio de los fundamentos pero también capacidad tecnológica y creatividad para concebir nuevos productos y nuevos principios operacionales de manera ética y responsable con el ambiente.

Aunque la ingeniería química se basa fuertemente sobre el conocimiento existente en

*5 VILLERMAUX JACQUES. Future Challenges For Basic Research in Chemical engineering. Chemical Engineering Science, Vol 48. No. 14, pp 2525-2535, Great Britain.*

disciplinas clásicas como las matemáticas, la física, la química, la biología, la ingeniería química no es simplemente la combinación o la simple aplicación de estas disciplinas. En la actualidad, la complejidad de los fenómenos encontrados en la industria de procesos ha obligado a los ingenieros químicos a desarrollar conceptos y métodos novedosos que integren en el análisis y operación una amplia variedad de procesos que ocurren simultáneamente.

La investigación en ingeniería química tiene sus propias características:

- \* Ella adopta el conocimiento existente en otras disciplinas para solucionar sus propios problemas.
- \* Ofrece nuevos objetivos, fenómenos, operaciones y procesos a estas disciplinas los cuales frecuentemente requieren investigación específica en nuevas áreas.
- \* Puede proporcionar soluciones a problemas encontrados en áreas adyacentes, por ejemplo, el dominio que se tiene de los fluidos bifásicos se proyecta hacia los físicos o la catálisis en lecho fluidizado hacia los químicos.
- \* Desarrolla su propia metodología, para el trabajo experimental (como el análisis dimensional, el escalamiento, la similitud dinámica); para la selección, diseño, simulación y optimización de Procesos.

Los retos que la ingeniería química debe enfrentar en los años venideros son bien conocidos: nuevas fuentes de materiales y de energía, procesamiento de alimentos con nuevas tecnologías y nutrición, salud (contribuyendo con su dominio de procesos biotecnológicos y con su capacidad de ingeniería de procesos a favorecer la producción masiva de componentes activos y en general de drogas); diseño con seguridad de procesos y productos, aseguramiento de calidad en el proceso y en la reacción química; protección del medio ambiente y atender, de manera creativa, las necesidades particulares de los países en desarrollo.

## Complejidad del medio

Se ha saturado una etapa existente tanto en el mundo académico como en el industrial en la cual los procesos reales eran abordados con un enfoque fundamentalmente ideal, las nuevas herramientas computacionales y el conocimiento que se ha logrado en áreas complejas como los sistemas multicomponentes, sistemas multifase, análisis de procesos integrados, destilación reactiva, termodinámica molecular, han permitido abordar hoy en día, con bastante profundidad, áreas del conocimiento como las siguientes, haciendo que se mejore la predicción de propiedades y los procesos de simulación: Reología de fluidos no newtonianos; Procesos con polímeros fundidos; Fluidos supercríticos, por ejemplo los usados en ciclos de refrigeración no contaminantes para reemplazar los CFC's, Lechadas, dispersiones, suspensiones multifase; Sistemas con memoria como fluidos viscoelásticos, sistemas de transporte flotante, sólidos reactivos; Sistemas cuyas propiedades son controladas por fenómenos interfaciales, emulsiones, coloides, geles, espumas; Medios irregulares porosos o partículas sólidas en dispersiones, polvos (por ejemplo, polvos de titanio obtenidos por bombardeo con un chorro de  $TiCl_4$  sobre magnesio fundido) o aerosoles.

Para muchos de estos sistemas no se cuenta con métodos estándar para el diseño de equipos de proceso. La clave de estos procesos será descubrir como podemos describir estos medios complejos y los cambios químicos que ocurren en estos sistemas.

Una aproximación a la solución de estas dificultades se basa en el concepto de "medio efectivo" que considera el sistema como un medio pseudo-homogéneo caracterizado por propiedades promedio o propiedades "efectivas".

Otra estrategia puede ser considerar cada fase individualmente en un medio complejo y hacer balances de masa y energía individualmente y luego acoplarlos por medio de relaciones de transferencia y equilibrios interfaciales apropiados. En resumen el concepto de fase puede ser irrelevante en sistemas como aquellos

que exhiben comportamiento de microemulsiones o estructuras microscópicas complejas.

Es una necesidad evidente que se requieren nuevos desarrollos para describir mejor el comportamiento de aquellas sustancias y procesos en los cuales lo que sucede a escala capilar es muy importante.

## Nuevos y viejos paradigmas

El corazón de la metodología en ingeniería química contiene unos "paradigmas históricos" ejemplos de los cuales son:

- a) Las economías de escala estáticas
- b) El concepto de operación unitaria
- c) Etapas de separación y unidades de transferencia
- d) Analogías entre transferencia de momento, calor y masa
- e) Acoplamiento reacción-transferencia (módulo de Thiele and Hatta)
- f) Medio efectivo y propiedades
- g) Balance de materia, tiempo de residencia y distribución
- h) Dispersión axial
- i) Tanque continuamente agitado
- j) Mantenimiento tradicional

## Los nuevos paradigmas

Entre los nuevos paradigmas, sobre los cuales deberá desarrollarse la ingeniería química se pueden citar:

- a) Procesos dinámicos no lineales, básicos para la comprensión y la simulación de procesos, la conceptualización de procesos oscilantes, procesos simultáneos

de calor, masa y momento, propagación de olas de gran escala en reactores, análisis de sistemas caóticos, mezcla laminar de fluidos viscosos, etc.,

- b) Gerencia de la energía y de la Entropía  
Maximizar la eficiencia en el consumo de la energía es un reto permanente en la optimización de procesos; muchos autores han tratado de relacionar la eficiencia en la transferencia de masa y de energía con la rata de disipación de la energía, esta es la base de la famosa analogía de Chilton and Colburn que establece que las ratas de transferencia de momentum, calor y masa entre un fluido y una pared sólida están relacionadas.
- c) Estructura y organización de la materia condensada; transporte y reacción química en medios porosos, dinámica de flujo en membranas semipermeables, envenenamiento de catalizadores.  
El control de la estructura microscópica de la materia aplicando la metodología de la ingeniería química (polímeros). controlar la nucleación y coagulación de partículas pequeñas.
- d) Construcción de modelos autoadaptativos.

El modelamiento ha sido durante largo tiempo una herramienta básica para los ingenieros químicos, El desarrollo de modelos confiables, interactivos, y fáciles de implantar son objetivos básicos de la investigación en esta área.

Existe una amplia variedad de modelos, algunos de los cuales son contradictorios entre sí por sus características: Modelos detallados vs. modelos simplificados; modelos analíticos vs. sistémicos; estáticos vs. dinámicos; cajas negras vs. cajas blancas; modelos determinísticos vs. estocásticos; unidimensionales vs. bidimensionales vs. tridimensionales.

El reto aquí es encontrar “nuevos principios fundamentales” con más alto nivel de integración que los balances

estándar de momento, masa y calor empleados en un nivel microscópico. Se requieren, en particular, principios fundamentales de nuevo tipo aplicables a sistemas complejos, repensar las ecuaciones de Schrödinger, Boltzman, Fick y Fourier.

- e) Flexibilidad, principalmente flexibilidad de iniciativa.

### **Operación de procesos y diseño de nuevos productos.**

Gracias a la disponibilidad de nuevos materiales y al progreso en el modelamiento y control de procesos, los procesos existentes pueden ser operados bajo condiciones más severas en un amplio rango de presiones y de temperaturas. Las operaciones unitarias deben entonces ser, en consecuencia, revisadas con el fin de intensificar los flujos de transferencia y las velocidades de reacción.

Esto puede hacerse por métodos convencionales pero nuevos métodos abren nuevos caminos:

- a) Nuevos modos de contacto y acoplamiento, operaciones transitorias o cíclicas, flujo periódico reversible, reactores de membrana catalítica, y destilación reactiva.
- b) Integración de procesos y síntesis, integración de los objetivos de reacción química, calidad y conservación del medio ambiente en la misma operación unitaria.
- c) Nuevos equipos, con nuevos materiales como intercambiadores de calor construidos en cerámica que soportan temperaturas entre 2100 y 2200 F, materiales refractarios para hornos 2500 F; membranas para ultrafiltración.
- d) Nuevas fuentes de energía y nuevos medios de reacción, entre las cuales vale la pena mencionar el ultrasonido.

Las posibilidades de empleo industrial de los ultrasonidos y de los sonidos audibles de alta potencia han abierto un gran campo de aplicación llamado la ultraacústica definida como aquella parte de la física y de la ingeniería dedicada al estudio y aplicación de los ultrasonidos, al estudio de sus propiedades físicas, los materiales y dispositivos aptos para generarlos y detectarlos, sus efectos físicos, químicos y biológicos y como fuente alterna de energía limpia.

Se ha podido comprobar que algunas de las propiedades singulares de los ultrasonidos como su capacidad de desmenuzar la materia, su efecto catalizador de reacciones químicas, se debe más a la potencia que a la alta frecuencia de las vibraciones.

- e) Control de procesos con estrategias de control avanzadas.
- f) Nuevos sensores, el sueño de todo ingeniero químico es disponer de sensores inteligentes para medir todo, en cualquier momento, y en cualquier lugar.
- g) Economías de escala dinámicas o economías de especialización.
- h) Mantenimiento tecnológico, gerencia de la confiabilidad, ingeniería de mantenimiento, mantenimiento predictivo y mantenimiento proactivo.

En síntesis, la investigación en ingeniería química debe moverse en dos dimensiones a la vez: pasando de la escala macroscópica a la microscópica y molecular; es decir hacia análisis detallado y localizado para lograr una comprensión mayor del fenómeno y, por otro lado, pasar de una escala microscópica a la macroscópica mediante un sistema integrado que permita contabilizar los fenómenos individuales y expresar la manifestación de ellos, su efecto sobre el sistema complejo para predecir leyes fenomenológicas para el comportamiento de sistemas organizados.

## ELEMENTOS DE UN PROGRAMA NACIONAL PARA EL DESARROLLO DE LA INGENIERIA<sup>6</sup>

Los retos que plantea la economía colombiana, hoy en día a los ingenieros químicos y, en general a los ingenieros son: liderar el desarrollo económico nacional, modernizar el aparato productivo nacional, conducir el desarrollo tecnológico, generar tecnología, dar valor agregado a la producción nacional basado en conocimiento, gerenciar la tecnología, introducir la cultura de la normalización, el aseguramiento de la calidad y la metrología y aportar todos sus conocimientos para la gestión adecuada del medio ambiente y de los recursos naturales.

### La estrategia educativa para alcanzar el escenario ideal.

Los elementos de una estrategia nacional para el desarrollo de la ingeniería en general y de la ingeniería química en particular son:

1. Convertir a la investigación y el diseño en el centro del quehacer universitario.
2. Articulación curricular a todos los niveles.
3. Formación integral para el trabajo
4. Nuevos modelos pedagógicos para la tecnología.
5. Vinculación con el exterior
6. Fortalecimiento y mejoramiento institucional.
7. Establecimiento de un sistema de evaluación y seguimiento institucional.

---

<sup>6</sup> Estos comentarios hacen parte de un documento mas amplio realizado por el Dr. Pedro Amaya Pulido y Carzón Gaitán denominado "Apertura e Ingeniería" para el convenio ICFES-ACOFI-, Santafé de Bogotá, Agosto de 1995.

## 1. Convertir a la investigación y el diseño en el centro del quehacer universitario

El Diseño ha sido llamado con razón “una actividad quintaesencialmente cognitiva” (Goel & Pirolli, 1992). Está relacionado con las acciones del hombre transformadoras del ambiente en que vive y es, por lo tanto, de índole esencialmente práctica. Está también profundamente arraigado en las visiones del mundo que se desprenden de las culturas particulares.

Adicionalmente, el diseño evoca relaciones con creatividad, con el desarrollo de productos y formas nuevas. En suma, el diseño está relacionado tanto con aspectos de orden individual como con aspectos de índole colectivo. Los primeros son los referentes a los procesos intelectivos, internos al cerebro, de lectura comprensiva de símbolos y signos, de creación de esos mismos, de creatividad. Los segundos se derivan del hecho de que la lectura comprensiva siempre involucra convenciones culturales; es decir, los signos y símbolos tienen significado solo dentro de un determinado contexto cultural.... El diseño es, esencialmente, una actividad de solución de problemas de orden concreto, percibidos no como una formulación definida sino como una necesidad, que ocurre en un contexto cultural y socioeconómico, este si claramente definido y que tiene como resultado el listado de especificaciones de un artefacto, un sistema o un servicio.”<sup>7</sup>

## 2. Articulación curricular

Esta estrategia se refiere a la importancia de integrar a lo largo de los diversos niveles de formación, desde la educación básica hasta el doctorado, un enfoque de la ingeniería y de la tecnología acorde con la estrategia nacional que se defina.

El hilo que establece una continuidad de propósitos, entre los diferentes niveles, esta

---

<sup>7</sup> ANDRADE LONDONO, E. 1995. *Aproximaciones a una Pedagogía del Diseño*, UPN, Santafé de Bogotá.

constituido por las líneas de investigación a nivel superior, las que harán confluir las líneas de profundización y la temática de las tesis de grado.

## 3. Formación integral para el trabajo

Otra estrategia consiste en formar a los jóvenes para el trabajo y no principalmente para el empleo, esto tiene implicaciones de toda índole en el currículo especialmente en el terreno de la formación humanística, la cultura, la ética, la responsabilidad social, la estética, etc.; implica además una profunda formación científica y, el desarrollo de habilidades para relacionar conceptos con situaciones reales, formación en gestión de tecnología, gestión de proyectos y capacidad para comunicarse y relacionarse con los demás, formar líderes, mentes flexibles.

## 4. Nuevos modelos pedagógicos

### Creatividad y aprendizaje significativo

“El aprendizaje significativo es un proceso por el cual se relaciona nueva información con algún aspecto ya existente en la estructura cognitiva de un individuo y que sea relevante para el material que se intenta aprender. Existiría entonces, en el cerebro una especie de “malla de conceptos” de la que depende la posibilidad de aprendizaje de nuevos conceptos. Esta “malla” esta organizada jerárquicamente y se hace más compleja y más densa en la medida en que nuevos conceptos sean aprendidos significativamente.

La clave de la inclusión de un concepto nuevo en la estructura cognitiva es la relación que pueda establecerse entre el concepto nuevo y los ya existentes en la “malla” de la estructura cognitiva.

Estos tres elementos de la teoría, la “malla de conceptos”, las relaciones que se establecen para el aprendizaje significativo y la estructuración jerárquica de los conceptos en “la malla”, permiten una aproximación a la esencia de la creatividad. Según Novak (1982), la conducta creativa ocurre cuando un individuo hace asociaciones únicas entre conceptos que

pertencen a niveles superiores de la jerarquía conceptual. La conducta creativa es una especie de aprendizaje supraordenado que permite la percepción de nuevas relaciones entre conceptos subordinados<sup>8</sup>

“Esta aproximación no solo permite pensar en que es posible educar a un individuo para que sea creativo e intentar formas de hacerlo, sino que también es consistente con los elementos básicos de la estructura del “espacio del problema de diseño” establecidos por Goel y Pirolli (1992)<sup>9</sup>”

“La densidad de la “malla conceptual” de la estructura cognitiva de un individuo está estrechamente relacionada con su experiencia en la solución de problemas de diseño. La teoría del aprendizaje significativo prestará bases teóricas al papel de la experiencia tanto en la división del problema de diseño en sus partes componentes como en la aproximación a la solución final.”

“Adicionalmente, el proceso de “inferencia no deductiva” sería el equivalente del aprendizaje supraordenado que permite el establecimiento de relaciones nuevas entre conceptos de menor jerarquía en la “malla conceptual”. Un individuo creativo tendría, entonces una “malla conceptual” extraordinariamente densa, producto de sus experiencia significativa, que le posibilita establecer relaciones que otras personas con “mallas conceptuales” menos densas, no pueden ver por sí mismas”.

Trabajar en este sentido implicará:

- a) Desarrollo de la capacidad de abstracción
- b) Dominio profundo de los fundamentos, de los principios, de las leyes y de su expresión en lenguajes abstracto y en las matemáticas.
- c) Desarrollo de la capacidad de convertir conocimiento científico y necesidades identificadas en principios operacionales útiles.

---

<sup>8</sup> NOVAK, J. 1982. *Teoría y Práctica de la Educación*. Alianza Universidad, Madrid.

- d) Desarrollo de la capacidad de expresión semiótica en sus diversas manifestaciones
- e) Desarrollo de la capacidad de construcción de prototipos funcionales
- f) Repensar permanentemente la historia del desarrollo de los objetos e instrumentos, artefactos y servicios.
- g) Estímulo al aprendizaje autodirigido.

Estos objetivos pueden lograrse si se combinan adecuadamente el modelo epistemológico, el modelo instruccional en su justa proporción, el desarrollo de estrategias de solución de problemas débilmente estructurados, el trabajo por proyectos y por materias, etc.

### **Dominio tecnológico**

La educación en ingeniería debe propender por el desarrollo en el individuo de diversas fortalezas:

- a) Dominio tecnológico: Habilidad para trabajar con los contenidos y metodologías de un rango de tecnologías.
- b) Conciencia tecnológica: Conciencia sobre las implicaciones morales, sociales, éticas, económicas y ambientales de los desarrollos tecnológicos.
- c) Capacidad tecnológica o de fabricante competente: Definida como la habilidad para atacar un problema tecnológico y resolverlo de manera creativa ya sea a nivel individual o colectivo.
- d) Información tecnológica: Interpretada como la competencia y confianza en el manejo de la información tecnológica.
- e) Usuario competente o usuario “culto de la tecnología”: Habilidad para seleccionar y

---

<sup>9</sup> GOEL, V. & PIROLLI, P., *Structure of design Problem Spaces. En Cognitive Science, Vol 16, No. 3, Jul-Sep. , 1992.*

hacer uso de la tecnología para un propósito específico.

- f) Innovadores en potencia: Capacidad para encontrar principios operacionales nuevos que establezcan puentes entre las ciencias básicas y el mercado, entre las leyes de las ciencias naturales y las necesidades humanas en contextos particulares.

## 5. La Comprensión y la Expresión

Se deberá trabajar además por el desarrollo en los profesionales de las habilidades de expresión y comprensión en todas las dimensiones de la comunicación y de la significación.

## 6. Vinculación con el Exterior

Estimular las relaciones universidad-industria-centros de investigación y desarrollo sectoriales especializados, promover relaciones externas a través de los servicios de extensión y asesoría remunerada y no remunerada, ampliar la cobertura de las redes de datos y de comunicaciones internacionales y nacionales y estimular el trabajo entre pares mediante acuerdos internacionales de cooperación.

## 7. Fortalecimiento y Mejoramiento Institucional

Establecimiento de un sistema de evaluación y seguimiento basado en los siguientes parámetros:

- a) Plan de desarrollo institucional.
- b) Los exalumnos relación y retorno.
- c) El cuerpo profesoral: respetabilidad interna y externa, publicaciones, libros, generación de nuevos cursos, investigación, consejería y participación en laboratorios.
- d) Concepción organizativa: autonomía administrativa, distribución del poder, administración de los recursos, ingresos diferentes a matrículas, ejecución y planeación del presupuesto.
- e) Estudiantes: valores humanos, motivación, sentido de pertenencia.
- f) Plan de estudios: motivación por investigación desde abajo.
- g) Eficacia en sus dos componentes: eficiencia y efectividad.
- h) Infraestructura de investigación y de laboratorios.

### BIBLIOGRAFIA

ANAYA, Durand, "Ingeniería Química al Futuro", XXVII Convención Nacional, IMIQ, Ixtapa, Gro. 1987.

ASTARITA, G., "Frontiers in Chemical Engineering", Chemical Engineering Progress, January, 1988. (Traducción Rafael De Fex, Barranquilla, Enero de 1988).

BLUMENBERG, B., "Chemical Reaction Engineering in Today's Industrial Environment", Chemical Engineering Science, Vol. 47 No. 9-11, pp 2149-2162, 1992.

BOGOYA, Daniel. "Investigación y Proceso esencia de la Formación de Ingenieros Químicos", Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Abril de 1991.

CARBALLO, Luis. "Prospectiva en Ingeniería Química" ICFES-ACOFI, Julio de 1995.

DOBBEET D, and WOODS, W., "Mapping Industrial Activity", The OECD Observed, No. 188, June/July 1994, pp 19-23

HAIRSTON, Deborah, "CFC Alternatives: A Cold War", Chemical Engineering, January 1995, pp 65-67.

LANDAU, Ralph "Chemical Engineering: Key the Grow of the Chemical Process Industries", AIChE Symposium Series, Vol. 86, No.274, 1990.

VILLERMAUX, Jacques. "Future Challenges for Basic Research"