

INGENIERÍA QUÍMICA: UN ESPACIO DE INTEGRACIÓN Y ENCUENTRO ENTRE DISCIPLINAS

Víctor R. Ferro Fernández
Universidad Autónoma de Madrid

RESUMEN

La Ingeniería Química, cuyo contenido es: concebir, calcular, diseñar, hacer construir y hacer funcionar las instalaciones donde efectuar a escala industrial transformaciones químicas y/o físico-químicas para convertir materias primas en productos destinados al consumo de la sociedad, vive un momento particularmente interesante y complejo de su desarrollo caracterizado por profundos cambios tanto en la forma de diseñar nuevos procesos, como en la forma de realizar los cálculos que necesita esos desarrollos y, finalmente, en la manera de formar nuevos ingenieros. Una reconstrucción epistemológica de su desarrollo permite una comprensión más clara de este momento y, sobre esta base, adoptar una posición constructiva en cualquiera de las direcciones antes planteadas. El presente trabajo está orientado en esa dirección y se interesa, en particular, por las consecuencias que este fenómeno tiene en materia educativa.

LA INGENIERÍA QUÍMICA

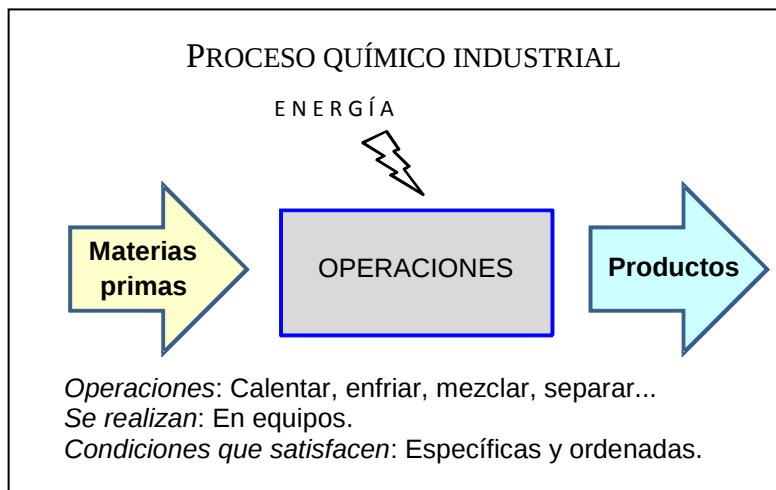
La Ingeniería Química (IQ) es una de las disciplinas científicas, tecnológicas y académicas de mayor impacto en la vida material e intelectual de la sociedad desde aproximadamente mediados del siglo XX. Quizás uno de los razonamientos más concluyentes sobre este hecho se debe a los profesores D.F. Rudd y C.C. Watson: “... *Que la sociedad moderna depende de la producción de sistemas de proceso [químicos] resulta evidente sin más que considerar que el norteamericano medio consume anualmente, en forma de alimentos, productos farmacéuticos, fibras, fertilizantes y otros productos manufacturados cerca de 30 kg. de amoníaco, 30 kg. de sosa cáustica, 40 kg. de cloro y 100 kg. de ácido sulfúrico ...*”. A pesar de que esta cita es de los años 60 y alude directamente a la sociedad norteamericana, tiene total vigencia y generalidad.

Desde el surgimiento de la IQ como disciplina independiente se han propuesto diferentes definiciones de su objeto de estudio, contenido y alcance, pero quizás la que mejor refleja su contribución a la vida material de la sociedad es la siguiente: (American Institute of Chemical Engineering, AIChE, 1935) “...[la IQ es] *la rama de la ingeniería que trata del desarrollo y aplicación de los procesos de fabricación en los que están involucradas transformaciones químicas o ciertas transformaciones físicas de las materias primas. Estos procesos constan generalmente de series coordinadas de operaciones básicas y procesos químicos unitarios...*” (Figura 1).

En la misma dirección H.F. Rase y M.H. Barrow señalaron que “...*La Ingeniería Química comprende las actividades relacionadas con la producción rentable de cosas útiles por procesos que implican fenómenos químicos o físico-químicos en una o más etapas...*”. De estas definiciones se puede derivar el contenido fundamental de la IQ: crear (desarrollar/diseñar), construir y operar procesos que transforman materias primas (en origen, naturales) en productos para el consumo de la sociedad. También reflejan la generalidad de la disciplina y sus profesionales, el ingeniero químico es un profesional versátil que puede desarrollar su actividad profesional en múltiples ámbitos: creación de nuevos procesos químico-industriales; construcción y montaje de las instalaciones; operación, mantenimiento y mejora de las mismas; comercialización de los productos; exploración de

posibilidades de negocio; la investigación fundamental para la propuesta de nuevas tecnologías, etc. Sin embargo, es bastante generalizado el reconocimiento de que es en la especialidad de Ingeniería de Procesos donde posiblemente pueda aplicar de forma más directa e intensa los conocimientos que aprendió como estudiante.

Figura 1. Esquema general de un proceso químico industrial que enfatiza en su arquitectura basada en operaciones unitarias



El origen de la IQ como disciplina independiente tiene lugar a finales del siglo XIX-principios del XX con diferentes manifestaciones en EE.UU. y Europa. En EE.UU., en particular, se realizó de tal forma que bien puede considerarse paradigmática. El profesor A.D. Little estableció sin lugar a dudas el proceso de diferenciación de la IQ de las disciplinas en cuyo seno se gestó “...*La Ingeniería Química no es un compendio de Química, Ingeniería Mecánica e Ingeniería Civil, sino una ciencia en sí misma...*”.

En las últimas décadas ha tenido lugar un extraordinario incremento de la complejidad técnica, organizativa, económico-financiera, etc. de la producción y los procesos químico-industriales. Esto ha estado relacionado, entre otras cosas, con la necesidad de mayor eficiencia de los procesos productivos, el aumento en la seguridad de la operación industrial, el cuidado del medio ambiente, etc. Como resultado de todo ello la IQ, que tuvo un considerable desarrollo en la segunda mitad del siglo XX, asiste en los momentos actuales a un profundo cambio que involucra no sólo a la forma de diseñar nuevos procesos y la forma de construir y operar los mismos, sino también a las metodologías que aplica en ambos campos, a los paradigmas de cálculo que emplea y, finalmente, a la manera de formar a los ingenieros químicos.

ESQUEMA METODOLÓGICO DEL PRESENTE TRABAJO

La comprensión de este momento de la historia de la IQ es fundamental para resolver los complejos problemas que enfrenta y asegurar la salud de su evolución futura. El presente trabajo pretende una modesta contribución en este sentido y tiene una clara vocación epistemológica y didáctico-metodológica. La utilidad y los límites de este tipo de contribuciones fue establecida por el historiador y filósofo de la ciencia norteamericano Thomas Kuhn: “...*aunque no es probable que una comprensión más clara de la naturaleza del desarrollo científico resuelva determinados enigmas de la investigación, dicha comprensión en cambio bien podría estimular una reconsideración de materias como la educación, la administración y la política científicas...*”. Sin embargo, no existe una definición tan clara sobre la forma de realizar estos trabajos. De hecho coexisten diferentes enfoques y posiciones al respecto.

La estructura metodológica de este trabajo se sustenta en la idea del filósofo ruso M. Kedrov de que en el desarrollo de cualquier ciencia y de todas en conjunto se distinguen dos tendencias: “...una tendencia está dirigida a la integración de los conocimientos, a su unificación en un sistema general, al descubrimiento de sus interconexiones; [mientras que] ...la otra está dirigida a la diferenciación de los conocimientos, a su ramificación ulterior, a la separación de unas ramas del conocimiento de otras...”. El esquema metodológico de este trabajo se completa con el reconocimiento de que las etapas de integración y diferenciación de las ciencias se suceden en el tiempo en arreglo a la ley de la dialéctica de la negación propuesta por el filósofo alemán G.W.F. Hegel.

Así, en la historia de cualquier disciplina científica se distinguen tres etapas: i) Etapa sincrética, en la que predomina la integración de los conocimientos científicos en un estado primitivo, no diferenciado de desarrollo de las diferentes disciplinas científicas. En este período, las conquistas del conocimiento son producto, fundamentalmente, de la acumulación de experiencias empíricas y, por lo tanto, predomina un pobre desarrollo teórico. ii) Etapa de la diferenciación del conocimiento, en la que tiene lugar la división de las ciencias primarias en otras ciencias que resultan de la evolución de ellas. Las nuevas ciencias definen sus objetos individuales de estudio, sus métodos particulares de investigación y sus sistemas teóricos. Aunque esta etapa representa un hito importante para cualquier ciencia, tiene un marcado carácter metafísico al concebir los fenómenos de la naturaleza aisladamente, dentro de los límites de cada ciencia, sustraídos de relaciones más generales. iii) Etapa sintética de desarrollo, en la que se evoluciona a la integración sistemática de los conocimientos de las ciencias particulares y la formación de complejos esquemas conceptuales caracterizados por su generalidad, integralidad, etc. En este momento la diferenciación de las ciencias se convierte no sólo en la premisa para su integración, sino también en uno de sus elementos componentes.

PERIODIZACIÓN EN EL DESARROLLO DE LA INGENIERÍA QUÍMICA

El período sincrético de la IQ está vinculado a la Química, la Ingeniería Mecánica, etc. La creación de nuevos procesos industriales químicos, su construcción y explotación se sustentaba en la experiencia de unos pocos “especialistas” de alguno de los campos anteriores que escogían como “línea de interés” este tipo de aplicaciones de sus conocimientos y experiencias. Los procesos se desarrollan como una solución única, sin evaluación de alternativas y, generalmente, sin optimización. La experiencia individual de estos especialistas se transmitía de forma individual (por tipo de proceso e industria), descriptiva y enciclopédica y constituye la única garantía de la calidad, la integridad y la consistencia del proceso desarrollado.

La etapa de la diferenciación del conocimiento (y de la actividad profesional) en IQ está relacionada con el concepto de operaciones unitarias (básicas). Con ello la IQ encontró un sistema categorial y una estructura metodológica propia que le permitió completar su diferenciación como disciplina científica. A.D. Little dijo sobre esto: “...[la IQ es] una ciencia en sí misma, cuyas bases son las Operaciones Básicas, que adecuadamente dispuestas en una secuencia coordinada, constituyen un proceso químico tal como se concibe a escala industrial...” (Figura 1).

El concepto de operaciones unitarias “soportó” (y soporta aún hoy, aunque en otro contexto lógico) la función profesional del ingeniero químico de diseñar operaciones, equipos e instalaciones industriales. Esto se debe al hecho de que las operaciones utilizadas en la industria química son, en lo fundamental, unas pocas que se repiten en los diferentes tipos de procesos, se basan en principios físicos comunes y tienen técnicas de cálculo semejantes, independientemente de la industria y el producto de que se trate.

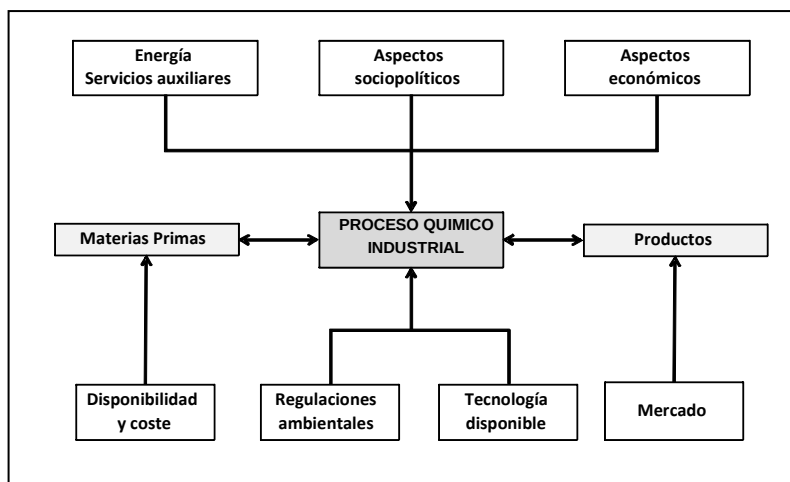
Sin embargo, las operaciones unitarias consolidan, a la vez, una visión disciplinar (segregada) de la IQ. Aparecen los conceptos y las disciplinas Operaciones de Transporte, Operaciones de Transferencia de Calor, Operaciones de Separación, etc. que, estructuradas sobre la base de una lógica esencialmente deductiva, separan artificialmente el proceso químico en partes independientes. Esto, a

la postre, dificulta la comprensión integrada del mismo y se convierte en una severa limitación al elaborar propuestas tecnológicas complejas e integrales.

El carácter objetivo de la integridad del proceso químico se reveló de forma cada vez más clara en la medida en que aumentó la complejidad de las instalaciones industriales y de los proyectos para su construcción. Simultáneamente, se hizo patente la conexión del proceso y la actividad químico-industrial con otras esferas de la ciencia y la actividad humana (Figura 2). Esta fue la base de la etapa sintética en la historia de la IQ. Probablemente la primera expresión científica de este período de la historia de la IQ fue el concepto de fenómenos de transporte introducido en los años 50 por los profesores B.R. Byron, W.E. Stewart y E.N. Lightfoot.

La necesidad de una visión integrada del proceso químico se desprende inmediatamente del hecho de que las operaciones unitarias que conforman un proceso químico no pueden ser cualesquiera ni organizarse de cualquier manera. Por el contrario, tienen que ser específicas y ordenadas (Figura 1) y el proceso de su organización (creación de un proceso industrial nuevo) debe reflejar las restricciones que resultan de las características generales del mismo. Así por ejemplo, en la operación de calentamiento, los detalles de la selección del medio calefactor y del equipo donde se realiza, las dimensiones, el diseño de éste y otros factores no menos importantes de su implantación tecnológica, están condicionadas por la naturaleza del fluido a calentar, las “dimensiones” del proceso, las condiciones de presión y temperatura del calentamiento, etc. Estas cuestiones están determinadas, no por la naturaleza misma de la operación sino por el proceso donde el calentamiento tiene lugar. En una dimensión más general, y teniendo en cuenta que el proceso químico responde a una necesidad y tiene una función social, está claro que el desarrollo de nuevos procesos químicos responde a un complejo esquema de subordinaciones y determinaciones (Figura 2).

Figura 2. Interrelaciones que determinan la estructura del proceso químico industrial.



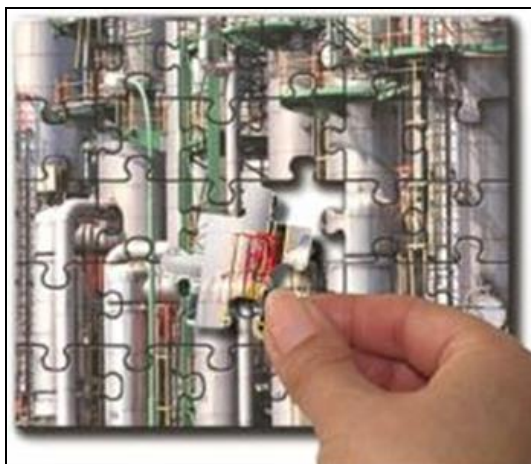
La creación de un proceso nuevo responde a una construcción lógica de naturaleza inductiva, donde el ingeniero de procesos debe componer una secuencia ordenada, física y tecnológicamente consistente, funcional y económicamente optimizada, de operaciones para conseguir un proceso industrial que satisfaga las especificaciones de producto y proceso, planteadas como premisa de trabajo. La editorial Wiley-VCH escogió la metáfora de la construcción de un puzle para reflejar esta idea en la portada del libro “Rules of Thumb in Engineering Practice” (Figura 3) del profesor D.R. Woods.

LA ETAPA SINTÉTICA EN LA HISTORIA DE LA INGENIERÍA QUÍMICA

La IQ se enriquece y extiende sus fronteras por integración con otras disciplinas relacionadas: Química, Física, Matemática, Biología, Informática, etc. Esto tiene lugar cuando todas estas disciplinas

están consolidadas y también se han afianzado diversas ciencias de transición entre las mismas: Química-Física, Bioquímica y otras. Como resultado, el fenómeno de integración en IQ ocurre muy rápidamente en el tiempo. Esto tiene importancia por sus consecuencias en diferentes esferas del quehacer químico-ingenieril. Las actividades directamente ligadas a la producción han evolucionado con notable rapidez, mientras que sectores como la formación universitaria de ingenieros, la administración de empresas, las políticas científicas y otras semejantes no reflejan aún de forma completa, sistemática y en todas sus consecuencias la integración. El cambio en los paradigmas de cálculo en IQ es un ejemplo que lo ilustra perfectamente.

Figura 3. Detalle de la portada del libro “Rules of Thumb in Engineering Practice” de D.R. Woods (2007, Wiley-VCH).



Apenas en veinte años (entre los años 1970 y 1990, aproximadamente) se transitó del cálculo ingenieril basado en el uso de reglas de cálculo y nomogramas, al cálculo computacional soportado por paquetes de programas comerciales. Las empresas de ingeniería, estimuladas por la complejidad y el rigor de los cálculos que demanda el desarrollo contemporáneo de procesos industriales han incorporado rápida y plenamente el nuevo paradigma. Inclusive, el desarrollo de software para la simulación de procesos se ha convertido en una pujante actividad laboral-productiva y comercial en IQ. Sin embargo, en la formación universitaria de ingenieros químicos y por diversos motivos, la incorporación de los simuladores de proceso no ha ocurrido con la misma rapidez ni la misma extensión.

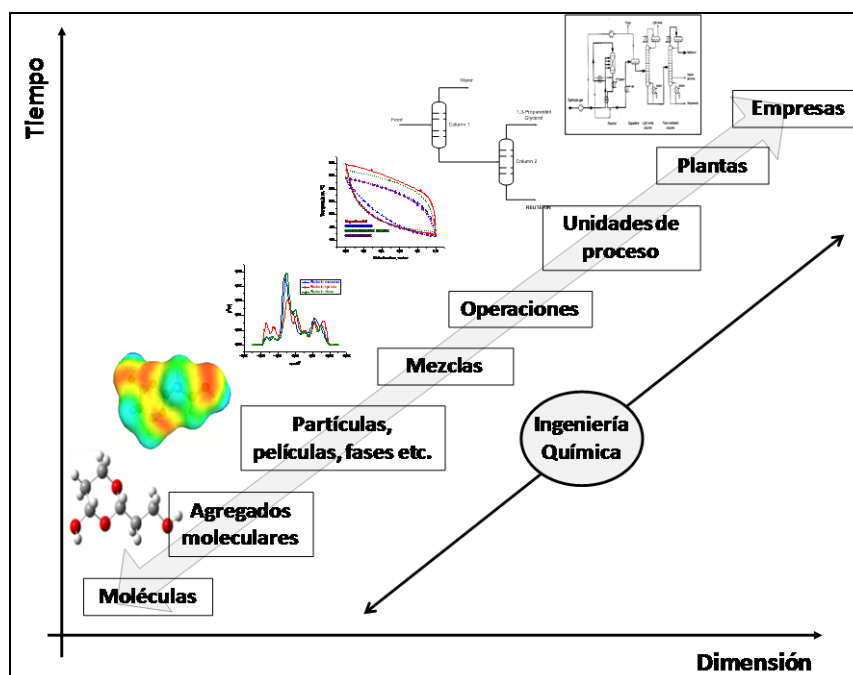
LA CADENA DE SUMINISTRO QUÍMICO

Un reconocimiento decisivo a la extensa y compleja integración multidisciplinar del período sintético de desarrollo de la IQ, tuvo lugar a inicios de este siglo con la aparición del concepto de cadena de suministro químico (Chemical supply chain, Figura 4) en los trabajos de I.E. Grossmann, A.W. Westerberg, J.C. Charpentier y otros prestigiosos especialistas. I.E. Grossmann y A.W. Westerberg hablan de “...*design and operation of chemical process systems, ranging from microsystems to industrial-scale continuous and batch processes...*”. Charpentier insiste en que es necesario entender las relaciones a nivel de nano y micro-escala para convertir las moléculas en productos útiles a escala industrial, para transformar “...*molecules into money...*”.

El concepto de cadena de suministro químico tiene dos consecuencias importantes para la IQ: i) El rendimiento y la selectividad de los procesos químicos se regula y modula a nivel molecular y, ii) Es posible diseñar procesos y productos completamente nuevos sólo con la información obtenida por métodos computacionales sobre la estructura molecular de las especies químicas participantes en el proceso en cuestión. La primera “recorre” la cadena de suministro químico de la macro a la micro-escala mientras que la segunda lo hace en el sentido contrario; pero ambas son determinantes en

tiempos en que la competitividad en el sector químico-industrial obliga a desarrollar nuevos procesos innovadores y alcanzar elevados rendimientos y selectividades en los existentes.

Figura 4. Cadena de suministro químico.



La búsqueda de los fundamentos de los procesos industriales en la micro y la nano-escala y el diseño de nuevos procesos industriales desde ésta, permite otra perspectiva para el perfeccionamiento y la racionalidad de los primeros. Esta nueva perspectiva tiene su expresión concreta en una novedosa y revolucionaria corriente denominada “Intensificación de Procesos” que se traduce en equipos y tecnologías altamente eficientes, capaces de cambiar de forma significativa los tamaños y los costes de las plantas químicas. La anticipación de fenómenos, procesos y operaciones por medios virtuales constituye una de las principales vías para la intensificación de procesos. La Industria Química se vislumbra desde la visión que aporta la Intensificación de Procesos más racional, más respetuosa con el medio ambiente, de menor escala, etc.

Según J.C. Charpentier, en este nuevo contexto los cuatro objetivos fundamentales de futuro para la industria química y de productos son: i) Increase productivity and selectivity through multi-scale control of the process, molecular information engineering and nano-tailoring of porous and crystalline materials. ii) Process intensification multifunctional reactors, new operating modes, micro-engineering, micro-technology. iii) Formulation product design and engineering emphasis complex fluids emulsion solids technology. iv) Multi-scale and multidisciplinary computational chemical engineering, modellization and simulation and optimization–control–safety.

La idea de la cadena de suministro químico supone, en cierta medida, la vuelta de la IQ a su integración con las disciplinas Física, Química, Biología, etc. de su período sincrético de desarrollo, pero ahora en un nivel cualitativamente superior de conocimiento y, por tanto, de capacidad para la obtención de productos. Operacionalmente esto supone la utilización de conocimientos y herramientas de dichas disciplinas en la actividad ingenieril de desarrollo de nuevos procesos, operación de los existentes, etc., incluido el uso en forma creciente de los ordenadores, la inteligencia artificial, y los sistemas expertos en el diseño de procesos y la producción.

DE LA ESTRATEGIA EN INGENIERÍA DE PROCESOS A LA INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PROCESOS

El período sintético de la historia de la IQ ha hecho muy patente la necesidad de marcos estratégicos robustos para lograr procesos químicos industriales exitosos, superando la complejidad multi-variable de los mismos y el carácter multi-objetivo de las tomas de decisiones durante el ciclo de vida de los proyectos correspondientes. Aunque la idea de la planeación estratégica de la producción es aplicable a toda la actividad en IQ, en este epígrafe se prestará especial atención a la función estratégica en la Ingeniería de Procesos. Para entender este tema es necesario conocer la forma en que se desarrollan procesos químicos nuevos.

Un proyecto en IQ (Figura 5) comienza siempre con la identificación de una necesidad o problema general (primitivo) a resolver. Posteriormente ese problema debe ser “transformado” en problemas ingenieriles específicos, de lo que depende en buena medida su éxito.

*Figura 5. Etapas de un proyecto en ingeniería y contenido de cada una de ellas.
Se destaca la etapa de Ingeniería de proceso (cursiva).*

ETAPAS PROYECTO	CONTENIDO
Definición y alcance	Problema primitivo Problemas ingenieriles específicos Análisis preliminar de viabilidad
<i>Ingeniería de proceso</i>	<i>Síntesis de alternativas</i> <i>Análisis de alternativas</i> <i>Optimización de l/s mejor/es alternativa/s</i>
Ingeniería de detalle	Diseño completo de la planta
Construcción y montaje	Ejecución de la obra
Puesta en marcha	Arranque de la instalación

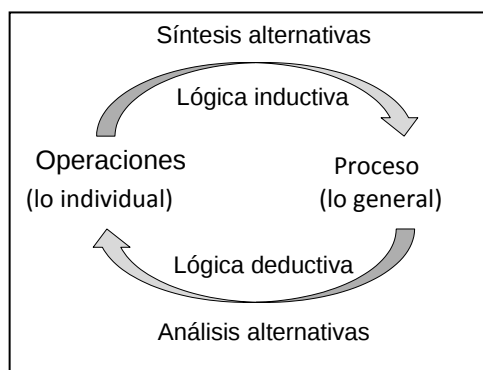
Una vez establecida la definición y alcance del proyecto, corresponde a los ingenieros químicos especializados en el diseño de procesos (Ingenieros de Proceso) plantear propuestas para la transformación industrial de las materias primas elegidas, en el producto deseado con las especificaciones planteadas. La propuesta de alternativas de proceso se conoce también con el nombre de síntesis de alternativas. Posteriormente, las alternativas propuestas se analizan individualmente para encontrar las mejores y éstas se someten a un pormenorizado escrutinio que conduce a la mejor de todas. Finalmente ésta se optimiza, se desarrolla completamente (Ingeniería de Detalle) y pasa a las fases de construcción, montaje y puesta en marcha¹ de la instalación industrial. El análisis de las alternativas individuales, a diferencia de su síntesis, sigue una lógica deductiva. La síntesis y el análisis de alternativas forman una unidad (Figura 6) de la que depende el éxito del proyecto en cuestión y forman parte del contenido de la Ingeniería de Procesos.

D.L. Rudd y C.C. Watson han afirmado: “...la síntesis de alternativas de procesos nuevos y originales requiere habilidades creativas e inventivas que no se pueden conseguir mediante el sólo estudio de la ciencia y las matemáticas...”. Así sugieren la necesidad de un recurso “experiencia” y otro recurso “organización estratégica de esa experiencia” para garantizar el éxito de la propuesta de nuevos procesos. La organización estratégica de la experiencia en la propuesta de alternativas es, además, el sostén de una creatividad productiva que garantiza la eficiencia de la Ingeniería de Procesos. Estas premisas dieron lugar al surgimiento del concepto “Estrategia en Ingeniería de

¹ Esta secuencia de actividades o tareas forman parte del Ciclo de Vida de un proyecto de Ingeniería. Aquí se han descrito de forma muy breve. Para profundizar en el tema, consultar bibliografía especializada.

Procesos” a finales de los años 60 del siglo XX, cuya primera presentación sistemática se realizó en el libro homónimo de los referidos autores. En el prólogo, D.L. Rudd y C.C. Watson insisten en el carácter metodológico de la obra: “...En este texto intentamos presentar una introducción equilibrada a la Estrategia de la Ingeniería de Procesos, proporcionando por una parte una visión industrial práctica y por otra los fundamentos de los procedimientos para mejorar las situaciones reales...”, que, en cierta medida, es también el principal valor de la Estrategia en Ingeniería de Procesos.

Figura 6. Estructura y relación lógica de las etapas de síntesis y análisis de alternativas en la Ingeniería de Procesos de un proyecto en IQ.



Durante años, toda la experiencia acumulada en la síntesis de alternativas ha sido organizada y sistematizada en forma de reglas empíricas (Rules of thumb). Esa heurística ha constituido la garantía de la consistencia y la calidad de los procesos propuestos, a diferencia de la etapa sincrética de la IQ donde ello dependía de la experiencia individual de los desarrolladores de proceso. Existe una importante bibliografía pública con detalladas presentaciones de la heurística para la síntesis de procesos. A modo de ejemplo se recomienda el libro: “Product and process design principles. Synthesis, analysis and evaluation”.

Las últimas décadas han puesto de manifiesto que la simple aplicación de las reglas empíricas no es capaz de dar solución a la síntesis de alternativas en procesos cada vez más complejos, además de que han devenido en una herramienta difícilmente manejable por su extensión. A finales de los 80 se hizo evidente la necesidad de enfocar el proceso químico como un “sistema de sistemas” y se evoluciona del concepto de “Estrategia en Ingeniería de Proceso” al de “Ingeniería de Sistemas de Procesos” (Process System Engineering, PSE). El profesor T. Takamatsu la define como: “...PSE is an academic and technological field related to methodologies for chemical engineering decisions. Such methodologies should be responsible for indicating how to plan, how to design, how to operate, how to control any kind of unit operation, chemical and other production process or chemical industry itself...”. También han trabajado exitosamente en la temática I.E. Grossmann, A.W. Westerberg, G.V. Reklaitis, G. Stephanopoulos, W. Marquardt, etc. Para W. Marquardt “...PSE is a largely mature and well-established discipline of chemical engineering ... in research, industrial practice as well as in chemical engineering education. The systems approach has been successfully adapted and refined to address the needs of designing, controlling and operating chemical process systems in a holistic manner...”.

Lo más notable de la PSE es que encuentra en los métodos computacionales la solución a la complejidad de los procesos químico-industriales y resuelve la toma de decisiones en el desarrollo de procesos a partir del uso de modelos matemáticos. Según el propio W. Marquardt: “...PSE has been evolving into a specialized field at the interface between chemical engineering, applied mathematics and computer science with specific model-based methods and tools as its core competencies to deal with the inherent complexity of chemical processes and the multi-objective nature of decision-making during the lifecycle of the manufacturing process of chemical products...”. De esta forma la IQ asiste a un momento conceptual y operativamente superior de su etapa de integración, en el que la toma de

decisiones durante la síntesis de alternativas descansa en potentes programas computacionales capaces de recrear toda la experiencia empírica acumulada anteriormente, distinguiéndose dos tipos de estrategias para la síntesis de alternativas (Figura 7). Por otro lado, las herramientas computacionales desarrolladas en la PSE dan soporte metodológico a la unidad de las etapas de síntesis y análisis de alternativas explicada anteriormente (Figura 6) con lo que la Ingeniería de Procesos gana en sistematicidad.

Figura 7. Estrategias para la síntesis de procesos

Strategies for process synthesis	
Knowledge-based strategies	Optimisation-based strategies
Make use of heuristic rules	Based on a superstructure of design alternatives
Are based on the experience	Modelled using mixed integer nonlinear programming
Provide qualitative ranking of design alternatives	Provide a quantitative ranking of design alternatives

Se ha demostrado que, durante la Ingeniería de Proceso de un proyecto se tiene la mayor posibilidad de incidir en su coste total. El ahorro económico se consigue proponiendo y evaluando el mayor número posible de alternativas. A la vez, con el mayor rigor y en el menor tiempo posible. Es incuestionable que esto se consigue sólo utilizando eficaz y creativamente paquetes de programas de alto nivel de especialización. Por ejemplo, la Aspen Technology Inc. ha demostrado que con su producto comercial Aspen ONE se consigue aumentar aproximadamente cuatro veces la productividad de un ingeniero en el diseño de procesos, así como reducir considerablemente los costes de inversión operativos de procesos diseñados con el soporte del software.

Quizás uno de los retos más importantes y representativos de este momento de desarrollo de la IQ (que tipifica el contenido y la forma de operar de la PSE) es el conocido como “integrated asset modelling” para optimizar la explotación de reservas de petróleo y gas, “...[which] is an end-to-end software solution that integrates reservoir, wells, surface infrastructure, and process facilities—as well as the asset's operating parameters, financial metrics, and economic conditions—into a single production management environment. The entire reservoir and production system is streamlined into operational decision-making and planning workflows, considering the economic impact throughout the life of the field...”.

Finalmente, los trabajos en el campo de la “Nanoscale Process Systems Engineering: Toward Molecular Factories, Synthetic Cells, and Adaptive Devices” ponen de relieve una de las expresiones más concluyentes de la complejidad y la dimensión alcanzada en etapa de integración sintética en IQ al fusionar en una dirección única de trabajo los conceptos de cadena de suministro químico y sistemas de ingeniería de proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- BIEGLER, L.T.; GROSSMANN, I.E.; WESTERBERG, A.W. (1997): Systematic methods of chemical process design. New Jersey. Prentice-Hall PTR.
- BROWNRIGG, N.; ZHANG, J. (2013): Optimize energy with activated engineering workflow in process simulation. Aspen Technology, Inc.
- CHARPENTER, J.C.; MC KENNA, T.F. (2004): Managing complex systems. Some trends for the future of Chemical and Process Engineering. Chemical Engineering Science. 59, 1617-1640.
- GROSSMANN, I.E.; WESTERBERG, A.W. (2000): Research challenges in Process Systems Engineering. AIChE J. 46, 1700-1703.
- KEDROV, B.M. (1974): Clasificación de las ciencias. Moscú. Editorial Progreso.
- KEIL, F.J. (2007): Modeling of process intensification. Berlin: Wiley-VCH.

- KLATT, K.; MARQUARDT, W. (2009): Perspectives for process systems engineering. Personal views from academia and industry. *Computers and Chemical Engineering*. 33, 536-550.
- KUHN, T. (1980): La historia de la ciencia. En: *Ensayos Científicos*. México, DF.
- RAHMAWATI, S.D.; WHITSON, C.H.; FOSS, B.; KUNTADI, A. (2012): Integrated field operation and optimization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 81, 161-170.
- RASE, H.F.; BARROW, M.H. (1968): *Project engineering of process plants*. New York. John Wiley and Sons.
- RUDD, D.L.; WATSON, C.C. (1976): *Estrategia en ingeniería de procesos*. Madrid. Alhambra. Traducción de la primera edición en inglés de 1968.
- SEIDER, W.D.; SEADER, J.D.; LEWIN, D.R. (2001): *Process design principles. Synthesis, analysis and evaluation*. New York. John Wiley and Sons Inc. Second Edition.
- STEPHANOPOULOS, N.; SOLIS, E.O.P.; STEPHANOPOULOS, G. (2005): Nanoscale process systems engineering: Toward molecular factories, synthetic cells, and adaptive devices. *AIChE J.* 51, 1858-1869.
- TAKAMATSU, T. (1983): The nature and role of process system engineering. *Computers and Chemical Engineering*. 7, 203-218.
- WEI, J. (1988): Future directions in chemical engineering education. *Chemical Engineering Education*, 21, 12-17.
- WOODS, D.R. (2007): *Rules of thumb in engineering practice*. Weinheim. Wiley-VHC.