

***DISEÑO, SIMULACIÓN,  
OPTIMIZACIÓN Y SEGURIDAD  
DE PROCESOS***

***Parte II***

***INGENIERÍA DE PROCESOS***

***EL PROBLEMA DE DISEÑO DE PROCESOS.***

***CARACTERÍSTICAS GENERALES***

*Dr. Nicolás José Scenna*

*Dr. Nestor Hugo Rodríguez*

*Dr. Juan Ignacio Manassaldi*

## *I. INTRODUCCIÓN. NATURALEZA DEL PROBLEMA DE DISEÑO*

En la Parte I se han presentado en forma general las características de la ingeniería en cuanto saber disciplinar y profesión, en particular la ingeniería química; y una breve descripción de la evolución histórica, enmarcada ésta en la aceleración de la evolución científico-tecnológica global que revoluciona todo campo del saber científico y sus aplicaciones tecnológicas. Se describió en forma general las particularidades de la ingeniería de procesos como parte fundamental de la ingeniería química, y sus áreas principales. Se enmarcó la asignatura en relación con las demás materias que componen la currícula y se desarrollaron aspectos relevantes que perfilan los objetivos principales en el contexto de la carrera.

Con respecto a la tarea de diseño, en particular de los procesos químicos, en primer lugar han sido definidos y caracterizados, resaltando sus componentes estructurales generales, de una manera sistémica. Además, se enumeraron y analizaron someramente los vínculos y relaciones entre ellos, y con el proceso en su totalidad.

Finalmente, se mencionó la evolución acelerada que presenta la tecnología en todos los campos, lo cual repercute en la tarea del ingeniero. Con más detalle, se ha enfatizado que uno de los núcleos centrales de la tarea del ingeniero de procesos es el proyecto de diseño. Este principalmente consiste en un proceso, cuyas dos principales etapas son las tareas correspondientes al *diseño conceptual - a menudo denotado como ingeniería básica-, y la ingeniería de detalle.*

Con respecto a la tarea de diseño conceptual, se destacó la importancia del modelado y la resolución de tales modelos mediante herramientas computacionales -por ejemplo, los simuladores de procesos-. A lo largo de la asignatura nos centraremos en el diseño conceptual. Hemos destacado que se caracteriza por una tarea *sistemática e iterativa*, que involucra al lazo o ciclo “*síntesis-simulación/optimización-análisis .. síntesis-simulación...*”.

Se remarcó que la etapa de *síntesis es la encargada principalmente de proveer (diseñar, definir) la estructura del proceso*, mientras que la de *simulación se enfoca principalmente en resolver los balances de materia y energía a los efectos de evaluar la producción, consumos, características básicas de los equipos componentes del proceso, de tal forma de estimar los costos de inversión, de los servicios, entre otros; y por lo tanto los costos totales asociados a la operación del proceso.*

Los modelos que componen el banco de modelos disponibles en los simuladores -que emulan el comportamiento del proceso-, se basan principalmente en una hipótesis fuerte, dado que *se asume que la estructura (flowsheet) del proceso es conocida*. Sin embargo, en todo diseño moderno se impone la necesidad de optimizarlo (mediante análisis de distintas alternativas posibles de operación) a los efectos de minimizar costos, o maximizar beneficios, u otro criterio de evaluación según decida el diseñador. Dado que existen numerosas alternativas para obtener procesos -que a partir de un conjunto de materias primas nos permitan obtener los productos deseados-, existirá una dificultad importante asociada a la etapa de *síntesis*, ya que a medida que sea eficiente dicha etapa (o sea generar numerosas estructuras alternativas para el proceso en evaluación) será necesario al optimizar contemplar/evaluar cada una de tales propuestas alternativas, y a la vez seleccionar la más conveniente dentro del conjunto disponible.

Finalmente, si bien se enfatizó acerca del costo (o el beneficio) como el criterio habitual para definir la función objetivo de minimización/maximización, debe tenerse en cuenta que los procesos -según se comentara en la parte I-, deben cumplir con las normativas acerca del impacto ambiental, o la seguridad, entre otros criterios. Esto es, no solo se consideran las instalaciones existentes en el proceso, y los costos de los servicios, sino la seguridad de los trabajadores y de la población circundante, de la infraestructura y del ecosistema circundante, entre otros criterios o restricciones. En otras palabras, el costo o el beneficio esperado optimizados, no son los únicos criterios decisivos que permiten tomar la decisión de construir la planta y ponerla en funcionamiento. Además, deben satisfacerse diversas restricciones que limitan el espacio de alternativas viables o factibles.

Se ha remarcado, además, que las nuevas filosofías de diseño, ya sea el diseño inherentemente seguro como el diseño basado en riesgo, imponen una evaluación de los aspectos de seguridad del proceso desde las primeras etapas, y no al final, próximos a la etapa de ingeniería de detalle; como resultaba habitual hasta hace relativamente poco tiempo. En este último caso, los *costos asociados a cualquier modificación del diseño podrían ser muy significativos, hasta prohibitivos desde el punto de vista de la construcción de la planta, y por lo tanto del avance del proyecto de diseño.*

En resumen, se comprende que la tarea de diseño es iterativa -en el sentido que se repite el ciclo tomando decisiones que introduzcan nuevas alternativas con el objeto de mejorarlo progresiva y sistemáticamente hasta lograr un diseño satisfactorio-. En esta parte II, *el principal objetivo es desarrollar con mayor profundidad la etapa de diseño conceptual de procesos, ya que como se ha mencionado, es una de las tareas más complejas, exigentes y desafiantes que enfrenta el ingeniero químico.* En particular, debemos destacar que los aspectos de diseño en la etapa conceptual se proyectan a la etapa de operación de la planta. Es decir, todos los objetivos o restricciones mencionados más arriba, deben ser evaluados durante todas las etapas del proyecto de diseño, incluyendo las iniciales, hasta generar la ingeniería de detalle y lograr la construcción y operación de la planta. Por ejemplo, antes de operar la misma debe “arrancarse”, por lo que existe una operación (que requiere un procedimiento operativo) para el arranque de planta. Nótese, que en un diseño de un proceso nuevo la planta todavía no existe, por lo que deben “anticiparse” todos los aspectos operativos necesarios para optimizar la operación, pero además considerar los aspectos de seguridad. Y éstos deben reflejarse adecuadamente en dicho procedimiento operativo, para lograr que la operación sea eficaz y segura. Obviamente, la seguridad debe considerarse en cualquier etapa del diseño; entre ellas, la confección de cualquier procedimiento operativo.

Es importante notar que si bien es habitual relacionar el buen diseño con uno optimizado -de tal forma de lograr los objetivos con mínimo costo o bien con máximo beneficio-; como hemos mencionado existe la necesidad de cumplir con normativas (ambientales, seguridad) y objetivos de calidad, operabilidad, entre otros, que imponen ciertas restricciones que deben cumplirse -por ejemplo calidad del producto, características de las emisiones, desechos, consumo de energía, la huella de carbono, o la huella hídrica, o bien minimizando la probabilidad de ocurrencia de potenciales accidentes (incendios, explosiones, otros).

Esta situación impone múltiples objetivos contrapuestos, ya que en general, mayor seguridad (minimizar el riesgo) puede implicar mayor inversión presente, por ejemplo. Sin embargo, si se analiza el ciclo de vida del proyecto, hasta el desmantelamiento de la planta -

según se proyecta en el plan de inversiones del proyecto a lo largo de su vida útil-, los resultados de la evaluación seguramente resulten distintos. A lo largo de la vida útil, la probabilidad de ocurrencia de accidentes relevantes aumenta.

### *1.1 Tipo de Variables Involucradas en la tarea de Diseño*

Desde un punto de vista pragmático, el uso de técnicas de síntesis de procesos se introdujo lentamente como consecuencia de las condiciones cambiantes en la producción industrial y el surgimiento de tremendos avances productivos y tecnológicos. En este punto, conviene aclarar que existen diferencias muy marcadas entre procesos diseñados hace unas décadas y los diseñados en la actualidad; ya que se dispone ahora de métodos sistemáticos para la generación de las estructuras óptimas de los mismos (camino de reacción, redes de intercambio calórico, trenes de separación, etc.). Resulta lógico pensar, por lo tanto, que las innovaciones se fueron dando parcialmente, paso a paso, con el transcurso del tiempo, al igual que lo sucedido con las modernas medidas de seguridad que conforman las buenas prácticas y estándares de diseño actual.

Por consiguiente, la tarea de diseño lleva implícita la *necesidad de seleccionar* dentro de un espacio de posibilidades, aquellas alternativas óptimas -que sobre la base de un -o varios- criterio (s) predeterminado(s)-, cumplan con los objetivos deseados. Luego, debe encontrarse una metodología adecuada para resolver el problema matemático resultante. Por ejemplo, uno de los métodos propuestos para manejar las interrelaciones que vinculan los equipos entre sí y considerar las variables estructurales consiste en utilizar *variables binarias* (ceros y unos en el caso de sistemas binarios). En efecto, para modelar simultáneamente las *variables estructurales* (números enteros) y las *variables operativas* (reales), se acude a la programación matemática mixta. Por otra parte, las funciones que describen los procesos químicos son por lo general fuertemente no lineales, por lo cual el programa matemático asociado, es obviamente no lineal.

Otra característica, no menos compleja, asociada al vector de variables que debe considerarse en el modelado matemático del sistema, es el hecho que varias variables pueden tener un *comportamiento aleatorio*. Esto es, debido a características inherentes al proceso, o factores climáticos o de mercado, entre otros; las variables de operación no tienen valores únicos y/o fijos, sino que pueden fluctuar en torno a un valor estable, normal o nominal, admitiendo cualquier valor comprendido en un determinado rango de incertidumbre. Esto es particularmente importante cuando se analiza el proceso desde el punto de vista de la seguridad y la confiabilidad.

Dentro de este contexto, cabe mencionar que el diseño de procesos desde un punto de vista sistémico es complejo, y si bien se avanza permanentemente, en los problemas de gran dimensión -diseño de plantas industriales-, se recurre a diversas estrategias para abordar el diseño en forma rigurosa, pero a la vez práctica, factible.

Resulta redundante en este punto, afirmar *que en el estado del arte actual*, el problema formal de diseño planteado previamente resulta de solución compleja (con variables de decisión tanto continuas como discretas, variables estructurales, variables aleatorias, funciones no lineales y funciones difícilmente expresables matemáticamente).

## *II. PARTICION DEL PROBLEMA. ETAPAS EN LA TAREA DE DISEÑO*

Para modelar un problema complejo como el descripto, que no es posible resolver basándose en una herramienta o algoritmo matemático que involucre todos los aspectos a consi-

derar en forma simultánea, resulta lógico recurrir a la metodología desarrollada en el campo de la *teoría general de sistemas*. En efecto, tal como se expuso, dada la elevada magnitud y complejidad del problema que nos ocupa, es muy útil adoptar la estrategia de subdividirlo en subproblemas que sean factibles de ser abordados y, a partir de las soluciones parciales generadas, encontrar la solución al problema global. Esto tiene un costo, ya que la solución óptima global no es una “composición de soluciones óptimas de cada una de las partes”. Sin embargo, puede obtenerse una solución factible satisfactoria, comparada con métodos de diseño no sistematizados y de difícil solución.

Dentro de este contexto, en general, las etapas secuenciales propuestas para la partición adecuada del problema -la tarea de diseño-, comprenden: (1) *la definición del problema*, (2) *el establecimiento de la función objetivo, esto es, la determinación de los criterios en función de los cuales deben seleccionarse alternativas*, (3) *la síntesis del sistema propiamente dicha, que implica la génesis del conjunto de alternativas estructurales posibles*, y por último, (4) *la reducción del espacio de alternativas, seleccionando aquellas que cumplan en forma óptima con las especificaciones establecidas*. En consecuencia, la etapa de síntesis en el diseño del proceso es el paso creativo que implica la determinación y generación del conjunto de alternativas estructurales posibles capaces de cumplir con los objetivos especificados.

Queda claro que la síntesis de un proceso involucra decisiones en dos espacios distintos:

(a) el espacio de las diferentes alternativas estructurales, definidas por la topología y la naturaleza de las interacciones entre las unidades (diagrama de flujos);

(b) el espacio de los diseños alternativos para cada una de las unidades de operación (equipos) y las variables del proceso (flujos másicos, energéticos, presiones, etc.) -cada uno de los generados según (a)-.

Por lo general, un método sencillo para generar estructuras alternativas es utilizar reglas heurísticas.

En contraste con la etapa de síntesis, la *etapa de análisis* implica la evaluación de cada alternativa generada, conociendo las características del proceso -su estructura, las unidades que lo componen, y las variables que caracterizan ciertas corrientes de entrada/salida y servicios disponibles. En general, los simuladores de procesos han sido diseñados principalmente bajo esta perspectiva.

Dentro de este contexto, se vislumbra y explicita el núcleo central de la tarea de *diseño en la ingeniería de procesos*, mediante la descomposición del problema global en subproblemas o etapas independientes. Esta estrategia es conocida en general como el lazo iterativo *síntesis / análisis (conformada esta última por la evaluación y la optimización)*. Consecuentemente, no resulta extraño desde una perspectiva histórica, la aparición cronológica de procedimientos o algoritmos para implementarlas, en general como instrumentos independientes.

Debido a la elevada dimensión de los modelos asociados a la tarea de diseño, y la gran cantidad de información que debe manejarse, la única herramienta rigurosa viable para tal fin resultan ser los métodos computacionales.

La *etapa de análisis* fue la primera en desarrollarse y manifestarse bajo esta óptica. En efecto, en la década del 70 comienza a consolidarse la aplicación métodos computacionales en la ingeniería química; en particular la simulación de procesos por computadora o *process*

*flowsheeting*, como una parte de una actividad más general, la actividad del diseño de procesos asistido por computadora (*Computer Aided Design, CAD*).

Dada una estructura, que proviene de la etapa de síntesis, las herramientas de análisis permiten evaluarla *detalladamente* desde el punto de vista de su performance, en particular los balances de materia y energía, los mapas de presión, y a partir de ellos, la evaluación de costos, consumos, eficiencia, impacto en el ambiente, seguridad, etc-. Para ello, si pretendemos un diseño riguroso y viable, deberían aplicarse las distintas metodologías que involucran el análisis de riesgos, la confiabilidad y disponibilidad del proceso, entre otros aspectos complementarios al económico; de tal manera de rechazar, si fueran inviables, las estructuras propuestas en la etapa anterior, hasta decidir el diseño óptimo.

Finalmente, existe una creciente necesidad de considerar restricciones ambientales -el riesgo ambiental- en el diseño, dado que, aun siendo algunas alternativas prometedoras desde el punto de vista del costo y de la operabilidad, podrían eliminarse cuando se analiza el problema de los efluentes. Por último, además deben contemplarse ciertos aspectos generalmente no tenidos en cuenta. Todos los procesos requieren cierta flexibilidad operativa, para funcionar adecuadamente frente a ciertos efectos debido al funcionamiento prolongado, *tales como el ensuciamiento, la desactivación catalítica, cambios en la alimentación, cambios en la demanda y en las especificaciones del producto, variaciones en la operación estacional*, etc. Estas modificaciones en las condiciones operativas del proceso requieren modificaciones/adaptaciones en el diseño de muchas unidades (por ejemplo en los intercambiadores de calor, reactores y separadores). Otro aspecto importante, por otra parte, es el análisis de la factibilidad del arranque y parada del proceso, dado que en ciertos casos buenos diseños nominales deben abortarse debido a problemas insalvables en las citadas operaciones.

Con respecto a la *etapa de síntesis*, han surgido numerosos algoritmos para la generación de estructuras alternativas para un proceso, y si es posible, simultáneamente seleccionar la óptima. Los conceptos utilizados para la construcción de algoritmos se nutren de los más variados campos del conocimiento. Programación mixta, álgebra Booleana, termodinámica aplicada al análisis energético, sistemas expertos o inteligentes (inteligencia artificial), entre otros.

La importancia de las estrategias de síntesis de procesos puede comprenderse tomando en cuenta el hecho que, para cada nueva idea o nuevo producto; generalmente sólo menos del uno por ciento de todas las alternativas evaluadas “sobrevive” para lograr el *status* de diseño posiblemente definitivo o rentable. También es común que para la selección del *flowsheet* definitivo de un proceso típico a escala industrial, existan potencialmente del orden de  $10^{10}$  potenciales alternativas. Esto es, durante el proceso de diseño se deben generar (y evaluar) ese número explosivo de opciones. Entonces, es muy fácil comprender la meta: generar herramientas para la síntesis de procesos que minimicen el esfuerzo para crear, evaluar y optimizar todas las alternativas posibles para el mismo, dados sólo unos pocos datos a partir de los cuales las distintas alternativas puedan ser generadas. Y finalmente, seleccionar el diseño final del proceso.

Obviamente, deberán encontrarse procedimientos para evitar explorar completamente todas las posibles variantes o alternativas correspondientes. Luego, el problema de diseño *es abierto* debido a que es muy difícil seleccionar una solución. Muy probablemente sea posible determinar varias opciones competitivas (un conjunto de soluciones alternativas para el diseño

final; cada una con ventajas o desventajas según sea el objetivo considerado. Como se ha mencionado en diversas oportunidades existen múltiples objetivos simultáneos que deben considerarse (costos, seguridad, impacto ambiental, entre otros).

En resumen, no existe aún *una herramienta computacional (programa o algoritmo) capaz de resolver -global y simultáneamente- el problema completo de actividades en la tarea de diseño*, debido a la gran variedad de alternativas que deben contemplarse. Sin embargo, a medida que se simplifica (particiona) el problema (esto es, se adoptan subsistemas del complejo industrial a diseñar); los algoritmos propuestos se caracterizan por su mayor contenido formal y su robustez. Tal es el caso por ejemplo de la síntesis de trenes de separación -mediante columnas de destilación con o sin integración energética-, o de redes de intercambio calórico, entre otros.

Para ejemplificar el problema, supongamos un proceso genérico que contempla una etapa de reacción a la cual ingresan dos corrientes que contienen los reactivos, y como producto se obtiene una corriente líquida. Como se indica en la Figura (1), los reactivos no reaccionados, al igual que los productos colaterales o secundarios deben ser separados de los productos finales. Además, por razones de economía, los reactivos no reaccionados se reciclan al sistema, ya que la conversión no es muy elevada y la reacción, que es exotérmica, está limitada por equilibrio. Dado que los productos deben enfriarse a temperatura ambiente, existe la necesidad de establecer un intercambio calórico para lograr tal objetivo. Con el objeto de recuperar energía, se utilizan las corrientes de productos para precalentar las corrientes que ingresan al reactor. En la Figura (1) se esquematizan las secciones genéricas del proceso, tales como el bloque o sección de reacción, el de separación, el de intercambio calórico (representado por los diversos intercambiadores indicados), etc. Este problema es el típico caso con el cual se ejemplifica la necesidad de optimizar una relación de reciclaje, ya que los tamaños relativos de los equipos en las diversas secciones, además de la conversión alcanzada y la extensión de las reacciones no deseables o secundarias, dependen del mismo.

Dentro de este contexto, plantearse la síntesis del proceso completo globalmente, implica la generación simultánea de las alternativas estructurales correspondientes a todos los bloques especificados. Para ello, se debería considerar, además, la posibilidad de nuevas materias primas, nuevos caminos de reacción, otras temperaturas o presiones de operación para minimizar reacciones secundarias, etc. La cantidad de etapas de reacción, el tipo de reactores, entre otros aspectos. *Como se desprende y merece remarcarse, el espacio de alternativas a explorar es sumamente extenso, aún para un problema sencillo como el planteado.*

El problema del consumo energético depende de la integración calórica que permita recuperar energía por intercambio entre las corrientes de proceso, ya que la demanda insatisfecha (de esta forma), debe ser provista por los servicios (vapor, agua de enfriamiento, entre otros). Y por supuesto, elevan el costo operativo del proceso.

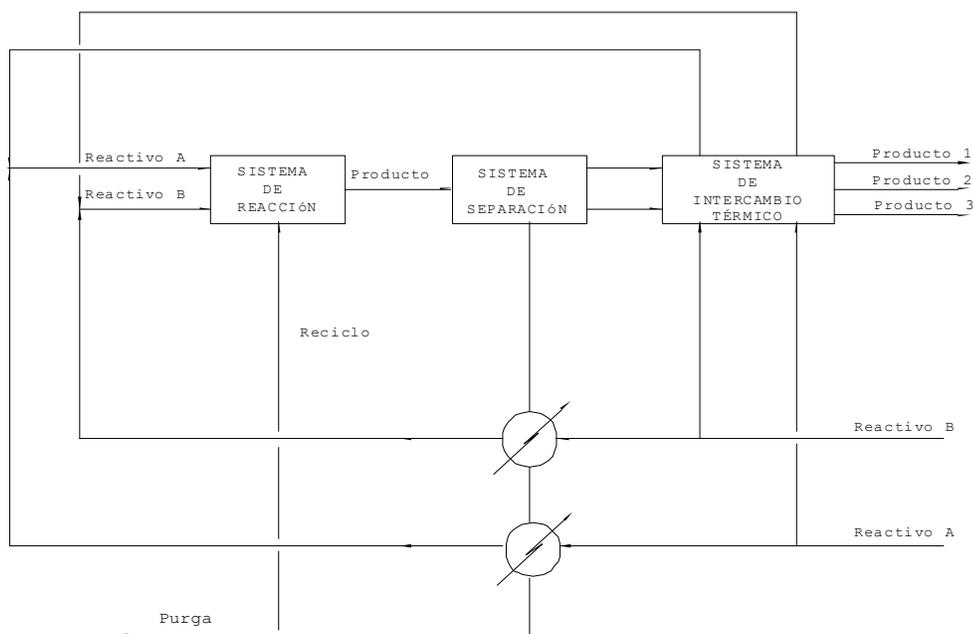


Figura 1: Esquema en bloques de un proceso genérico.

Por último, al igual que lo mencionado con respecto a la sección de reacción, el sistema de separación podría conformarse utilizando solo un equipo flash (evaporación súbita), o por un tren de columnas de destilación (una o varias) -existen además, de diverso tipo-, u otros sistemas de separación según sea el caso concreto de las sustancias involucradas (equipo de evaporación flash por ejemplo). Obviamente dependerá de las características de la mezcla a separar, - la volatilidad relativa entre componentes, si contiene azeótropos, si se exige separar todos los componentes constituyentes, las purezas o concentraciones especificadas, entre otros aspectos.

Como hemos ya comentado, si se particiona el problema global en subproblemas, es posible un planteo de la síntesis del sistema de reacción, la del sistema de separación, la del sistema de intercambio calórico, y la de otros subsistemas en forma separada del resto. Este enfoque, si bien simplificado (en el sentido que divide o particiona el problema general), provee una metodología general que resulta factible al enfrentar cualquier proceso genérico; capaz de lograr soluciones muy buenas *en forma sistemática*.

En la próxima sección se discutirán someramente algunos aspectos característicos de la tarea de diseño bajo este paradigma, y su evolución en el tiempo. Nótese que a la fecha se han publicado estrategias y creado diversos sistemas informáticos para la resolución de cada partición del problema arriba mencionada.

### II.1 METODO DE LA CEBOLLA. SINTESIS DE PROCESOS QUÍMICOS

Según Rudd (1968), quien propuso el término, el problema de *síntesis* puede ser definido simplemente como una tarea de invención de la estructura y la determinación de las con-

diciones operativas del proceso. De acuerdo a Westerberg (1980) la *síntesis de procesos* es la actividad de toma de decisiones para conjeturar:

- (a) cuál de las muchas partes componentes disponibles debieran usarse, o
- (b) como estas partes deberían interconectarse o ensamblarse para estructurar la solución óptima a un dado problema de diseño.

El desafío puede plantearse tanto para crear un nuevo proceso o para mejorar de acuerdo con un dado objetivo, uno existente. Nótese que la definición es general, y puede aplicarse también al diseño de nuevas moléculas, materiales, o aparatos con diversos fines.

Aunque resulte reiterativo, mencionamos que la tarea de diseño involucra un procedimiento iterativo, *en el cual la etapa de síntesis está siempre seguida por una etapa de análisis -simulación y optimización-*, la cual determina si la estructura y los parámetros propuestos funcionarán como se espera (Stephanopoulos, 1981). Si las metas de diseño no se alcanzan, se requiere un nuevo paso de síntesis para crear o una solución estructural factible o una solución mejorada.

Acerca de las metas u objetivos a alcanzar durante el diseño del proceso (la evaluación o análisis), como hemos mencionado podemos citar la productividad y rentabilidad, además de la seguridad, confiabilidad, controlabilidad, impacto ambiental, entre otros factores; que sabemos son objetivos en competencia. Dentro de este contexto, y debido a la complejidad del problema, la secuencia de la etapa de síntesis seguida por una de análisis (que incluye la optimización) es iterativa hasta que se encuentra un diseño satisfactorio. Ambos pasos pueden involucrar desde el uso de modelos muy simples hasta aquellos bastante complejos; por ejemplo técnicas auxiliares de computación que ayudan al ingeniero a manejar variables estructurales y la evaluación de los costos (que involucra el diseño preliminar de los equipos a partir de la resolución de los balances de materia y energía -simulación-). Esto es, se analiza la viabilidad técnica y económica.

Las herramientas de simulación estacionaria y/o dinámica, las de costeo, programas de diseño de equipos, entre otros, han sido ya mencionados. Veremos muy resumidamente en el apartado siguiente, algunas de las estrategias de síntesis más conocidas.

## *II.2 DESCOMPOSICIÓN DEL PROBLEMA EN SUBPROBLEMAS*

Como se ha mencionado, cuando se enfrenta un problema complejo, la experiencia y los postulados de la teoría general de sistemas aconsejan una división (partición) del mismo en subproblemas más sencillos, con una determinada estrategia, para luego componer la solución a partir de las soluciones parciales. Existen varias alternativas de descomposición para elegir y lograr una solución adecuada para un problema dado, pero se requiere encontrar la mejor para cada diseño específico. La estrategia de descomposición óptima dependerá del problema de diseño a resolverse. Las pautas señaladas por Westerberg y col. (1979), también contempladas en la llamada estrategia *de la cebolla* (Linnhoff y Townsend, 1982), (Shenoy, 1995) y el enfoque jerárquico de Douglas (Douglas, 1988) entre otros, son ejemplos de procedimientos de descomposición jerárquica.

La estrategia propuesta por Douglas (1988) es una de las más naturales y sencillas de comprender. En efecto, se propone que el *problema de síntesis y análisis del proceso completo* -definido como una actividad creativa bajo la cual se generan las ideas y se traducen en los equipos y procesos para producir nuevos materiales o productos-, puede descomponerse bajo

un *enfoque jerárquico*. Como la actividad de un pintor haciendo un bosquejo preliminar, la propuesta implica evolucionar hacia la solución a través de sucesivos refinamientos de una solución inicial aproximada. Se propone una secuencia en la tarea de diseño desarrollando en principio soluciones muy simples para luego agregar capas sucesivas de detalles.

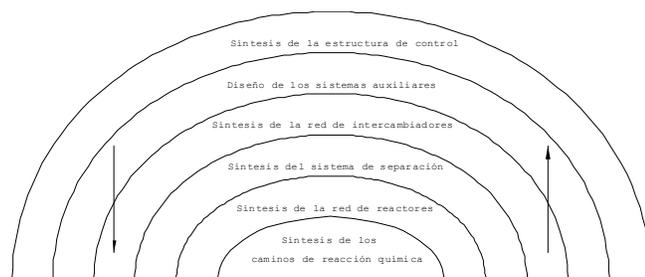
El enfoque jerárquico descompone al problema completo en una serie de subproblemas usando una jerarquía de decisiones (es decir, un orden o secuencia de resolución en las particiones en que se ha dividido el problema global). Para procesos petroquímicos, o procesos donde predominen los sistemas líquido-líquido o líquido-vapor, la jerarquía de decisiones puede sintetizarse (aquí indicado muy someramente) en la toma de decisiones secuenciales siguientes:

1. *Decidir entre procesos batch versus procesos continuos.*
2. *Decidir la estructura de reacción.*
3. *Adoptar la estructura de entrada-salida del proceso.*
4. *Adoptar la estructura de reciclos del proceso (corrientes de reciclo).*
5. *Adoptar la estructura general del sistema de separación.*
6. *Diseñar la estructura que permita la integración energética a los efectos de minimizar el consumo.*

En el caso que se trate de procesos batch o procesos en los que debe manejarse sólidos, es necesario introducir otras secuencias de decisiones (Douglas, 1988). Obviamente, dado que la jerarquía de decisiones es heurística en su naturaleza, es posible incorporar un nuevo orden o nuevos pasos en la estrategia o procedimientos de decisión, luego de acumular nuevas experiencias.

Debe notarse que se fija un orden de prioridades relativas al fijar la secuencia de subproblemas a resolverse. Por ejemplo, se supone más conveniente preocuparse primero por la estructura de reacción y el flujo de materiales, que por la red de intercambio calórico. No obstante, muy probablemente cuando se llegue a la etapa de diseño de la red de intercambio, deban modificarse decisiones tomadas en etapas anteriores, lo cual implica el ya anticipado proceso iterativo, hasta lograr un diseño final conveniente.

Cualquiera sea la estrategia elegida, es importante que cada solución parcial obtenida se verifique considerando el problema completo. Se debe por lo tanto implementar la retroalimentación de la información secuencialmente, hacia los pasos anterior y posterior durante el ciclo de la tarea de diseño (lazo de iteración).



Etapas jerárquica en la síntesis de procesos.

Figura 2: Modelo de la cebolla.

El *modelo de la cebolla* -ver Figura (2)-, provee una especie de cuadro esquemático de las *jerarquías adoptadas* para la partición del diseño de procesos en diversos subsistemas. Comenzando con la síntesis de los caminos de reacción química -el corazón de la cebolla-, se evolucionará hacia el *diseño de la red de reactores*, considerando la selectividad y capacidad. El diseño del reactor y las especificaciones de productos determinarán el *diseño del subsistema de separación (y reciclós)*, que forma la tercera capa de la cebolla.

Las tareas de reacción y separación definen en gran parte los requerimientos de energía y, por lo tanto; la cuarta capa involucra la *síntesis de la red de intercambio calórico o de intercambiadores de calor*. Dado que la recuperación de energía entre corrientes de procesos es generalmente insuficiente para cubrir las necesidades de energía total demandada, se requiere de servicios auxiliares externos. Por lo tanto, la quinta capa de la cebolla es el diseño de los sistemas auxiliares.

Para considerar cuestiones de operabilidad (como ser flexibilidad, controlabilidad, etc.) la capa final involucra el diseño del sistema de control. Como se remarcó más arriba, se debe enfatizar que ninguna *capa de la cebolla* puede diseñarse antes de especificar las capas internas. Simultáneamente, las capas internas no pueden definirse completamente sin diseñar “*la cebolla completa*” y considerar las interacciones. Consecuentemente, se necesitan *estrategias efectivas* -fáciles de usar y adecuadas para obtener las soluciones óptimas- a los efectos de lograr la síntesis de todos los subproblemas o subsistemas arriba planteados, permitiendo reducir el esfuerzo y tiempo requeridos para completar el diseño completo (que es iterativo). Esto es, el recorrido ida y vuelta, iterativamente, a través de las capas jerárquicas indicadas.

De aquí se comprende la importancia de contar con procedimientos efectivos para la síntesis de subunidades de procesos, tales como redes de intercambio calórico, etapas o caminos de reacción, secuencias de destilación (con o sin integración energética), estructuras de control, sistemas de servicios auxiliares, sistemas integrados de generación de energía y vapor, etc.

Aunque no incluido formalmente en la metodología planteada originalmente, es importante destacar aquí que los aspectos de seguridad deben ser analizados (según las nuevas filosofías de diseño) en cada etapa del diseño ilustrado en la Figura (2). En efecto, dentro de las actividades de diseño, además del sistema de control, se debe incorporar el diseño de los sistemas de seguridad del proceso, tales como los sistemas de alarmas, el sistema anti-incendio, piletas de contención para contener derrames en los parques de almacenamiento, el diseño de los sistemas de alivios, enclavamientos, antorchas, etc.

En general, existen normativas que exigen contemplar todos estos sistemas en función de las características de los peligros asociados a la operación de los procesos. Por lo tanto, el diseño convencional de procesos incluye (como protecciones) el diseño de tales sistemas básicos para asegurar la seguridad y/o confiabilidad en niveles aceptables.

Además, hemos comentado que también debe diseñarse la estrategia de parada y arranque del proceso, que son operaciones similares a la operación de un proceso batch. Por lo tanto, para cada diseño analizado, deben proponerse o evaluarse estrategias para la puesta en

marcha de la planta, diseñar los procedimientos operativos correspondientes, y proceder a un estudio de análisis de riesgos del proceso globalmente.

Todas las actividades mencionadas son imprescindibles para lograr un proceso seguro y confiable. Es lógico pensar que si se cumplieran las normas y las buenas prácticas de diseño no existiría la necesidad de evaluar integralmente la seguridad y la confiabilidad de procesos o diseños. Al profundizar en los próximos capítulos el lector pronto comprenderá que no es así. Existen muchos motivos por los cuales los diseñadores pueden cometer errores (error humano) durante el diseño que luego pueden generar problemas de seguridad durante la operación. Por ejemplo, errores al no contemplar circunstancias especiales (durante el arranque o puesta en marcha), o ahorro económico al no duplicar sensores de variables importantes (por si falla uno de ellos funciona el otro -temperatura en un reactor exotérmico, por ejemplo-). En este último caso, es evidente que aumenta la probabilidad de ocurrencia (ante una falla del sensor), de una explosión por aumento excesivo de la temperatura, al carecer de una señal redundante que facilitaría detectar la situación y tomar medidas de mitigación.

En otras palabras, es necesario un análisis de riesgos, conducido por un equipo que contenga especialistas en la ingeniería de la confiabilidad, independientes de los diseñadores del proceso. Como se verá luego (tercera parte de esta serie), el grupo se conforma con representantes de las distintas áreas/sectores de las oficinas de ingeniería relacionados con el diseño del proceso a analizar. Entre las causas de potenciales fallas, los errores humanos son una de las más relevantes por su frecuencia (por ejemplo, fijando en forma equivocada un *set-point* para un controlador durante la operación del proceso). Entre las menos frecuentes -según la ubicación geográfica-, podemos citar inundaciones, rayos -que pueden dañar o bien interferir en el funcionamiento de equipos electrónicos y sus señales-, daños provocados por vientos a velocidad elevada, etc.

En fin, resulta complejo enumerar las múltiples causas que pueden provocar accidentes en la industria de procesos. En la parte III de esta serie se verán resumidamente tales causales.

### *II.3 FORMALIZACION DEL PROBLEMA DE DISEÑO. ACERCA DE LA FUNCIÓN OBJETIVO Y LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PROCESOS.*

Queda claro entonces, que resulta complejo plantear en función de un esquema formal, la actividad de *diseño* en la ingeniería de procesos. Hemos visto ya en la primera parte, que se podría afirmar que un proceso químico está vinculado al tratamiento de materiales, mediante transformaciones fisicoquímicas y/o biológicas, y/o procesos de separación física, entre otras posibilidades. Denominamos proceso a la *unidad o sistema estructural de transformación por medio del cual los materiales que ingresan se transforman en los productos deseados*. Esta unidad o sistema estructural está compuesto por módulos (equipos u operaciones unitarias), encargados de realizar tareas específicas (separación, calentamiento, reacción química, etc.). Los equipos están conectados entre sí por medio de las corrientes que los vinculan, con el objeto de satisfacer la(s) tarea(s) especificada(s) de la mejor manera posible. Para utilizar un lenguaje común, se adopta un simbolismo esquemático que permite visualizar la topología (esquema estructural del proceso), que constituye el diagrama de flujo o *flowsheet*.

Sin embargo, éste poco puede aportar a menos que se especifiquen condiciones de operación (temperaturas, presiones, etc.) y las propiedades asociadas a las corrientes. Vimos

que existen dos grandes grupos de variables que deben ser diferenciadas. En este contexto, hemos llamado *variables estructurales* a aquellas que están íntimamente ligadas a la estructura del *flowsheet*; esto es, que especifican la presencia de los distintos equipos y su diagrama de interconexiones. Por otro lado, están las *variables de operación* que representan condiciones operativas (temperatura, caudal, presión, etc.), y ciertas características funcionales de los equipos, como ser áreas, número de etapas, etc., por lo general identificadas como parámetros *de diseño*.

Debemos recordar aquí que en la etapa de diseño conceptual del proceso, uno de los objetivos es obtener un diagrama o *flowsheet* óptimo del proceso. Esto es, como vimos, la representación a nivel de un “plano” del proceso y el detalle de cada una de las unidades que lo componen. Un esquema que luego, avanzando hacia la ingeniería de detalle, contendrá cada vez más información y detalle de las unidades de proceso, sus conexiones, equipos auxiliares, aspectos de control, seguridad, entre otros. Mas aún, en esta etapa final surge la necesidad del cálculo de las fundaciones, las dimensiones espaciales (en altura) de los equipos, el piping, entre otros. Por último, la representación en planta (layout) del proceso en el terreno. Esto es, un plano que representa la distribución en el terreno y las conexiones a nivel del piso y a distintas cotas de altura, de los equipos, salas de control y sistemas de almacenamiento (por ejemplo los tanques de almacenamiento), entradas y salidas a la planta, calles internas, sistemas de carga y descarga de materiales, edificios de oficinas y servicios auxiliares, sistemas de utilidades/servicios, entre otros. Es importante, entre otros aspectos en cuanto a la ubicación de las unidades constitutivas del proceso, ubicar cuidadosamente las estaciones de carga y descarga, los puntos de ingreso y egreso del personal y de las materias primas, la distribución de las unidades de proceso respecto de las instalaciones aledañas de otras plantas vecinas y los centros poblados lindantes. Esto es importante debido a que los flujos de materiales peligrosos, y su volumen almacenado, son factores de riesgo importante, por lo que resultan fundamentales desde el punto de vista del riesgo al cual se somete el personal y la zona circundante en general.

Todos los mencionados aspectos, son también parte de la tarea de diseño del ingeniero de procesos, y resultan fuertemente influenciados por las decisiones que se tomen en el inicio de la tarea conceptual de diseño. Es un hecho relevante, ya se ha comentado que los errores cometidos en las etapas tempranas obligan luego (si son insalvables en las etapas finales de construcción y detalle), a volver hacia atrás y tomar nuevas decisiones, perdiendo tiempo y dinero.

En referencia a la etapa de definición del *flowsheet* del proceso, hemos visto en las secciones anteriores que el problema formal es muy complejo dado el enorme número de alternativas estructurales posibles (etapa de síntesis). Mencionamos, además, que en la tarea de diseño “tradicional”, las evaluaciones desde el punto de vista ambiental, seguridad, operabilidad, no se tenían en cuenta habitualmente durante etapas tempranas del proyecto, sino cuando el *flowsheet* ha sido definido y los equipos han sido diseñados y decidida su ubicación en planta (layout). Esto es, avanzada la etapa de análisis (simulación, diseño de equipos, optimización). Esta tradición, según remarcamos reiteradamente, actualmente se contraponen a las filosofías de diseño seguro. Como veremos con un poco más de detalle más adelante, *las recientes filosofías de diseño* pretenden introducir el análisis de riesgos desde el principio de la tarea de diseño, lo cual involucra la etapa de síntesis. Aunque también mencionamos la difi-

cultad intrínseca de tal tarea, y la complejidad que adiciona considerar cuestiones de riesgo y operabilidad en las etapas tempranas de diseño, ya que no se conocen acabadamente todos los datos necesarios para tal tarea.

Igualmente, en la etapa de análisis (simulación y optimización de procesos) no es simple introducir el análisis de riesgos o evaluar la confiabilidad del proceso integralmente. Esto se debe a que los modelos resultantes resultan complejos y de gran dimensión, de difícil solución. Desde el punto de vista matemático, optimizar significa introducir una (o más) función (es) objetivo (s) -FO- a optimizar. Para lo cual debe plantearse un modelo y una estrategia para resolver el problema de optimización resultante.

El modelo, además de la FO, debería contener todas las restricciones respectivas a cumplirse, por ejemplo, la satisfacción de los balances de materia y energía. Es decir, un conjunto de relaciones de igualdad. Se ha mencionado ya en varias oportunidades que pueden existir varios objetivos contrapuestos. Hemos comentado que es bien sabido que toda actividad productiva de bienes o servicios se encuentra permanentemente sujeta a un marco de referencia (económico-financiero) en función del cual se evalúa su factibilidad. Sin pretender analizar los distintos enfoques para cuantificar los beneficios de un proyecto (privado, social, microeconómico, macroeconómico, etc.) el marco económico constituye la fuente cuyo *veredicto* resulta inevitable de contemplar en toda actividad de ingeniería. Por lo tanto, costos de operación, inversión, tasa de retorno, etc., son criterios que deben tenerse en cuenta en la función objetivo a optimizar.

Ahora bien, según vimos, no es el factor económico el único componente que define la operabilidad de un complejo o proceso químico. En efecto, existen una serie de aspectos que necesariamente deben ser contemplados, como por ejemplo *flexibilidad* que se refiere a la capacidad estructural y operativa del proceso para mantenerse funcionando con la mejor performance cuando las condiciones operativas corresponden a ciertos rangos de condiciones de diseño; o *controlabilidad, confiabilidad, seguridad, impacto sobre el ambiente, entre otros aspectos*. Consecuentemente, el problema a resolver en realidad es multiobjetivo.

Es importante remarcar que, al ser los objetivos contrapuestos, mejorar uno no significa necesariamente mejorar todos los demás, sino lo contrario (por ejemplo, en general para minimizar el riesgo en el funcionamiento del proceso es conveniente alejar las unidades entre sí en el layout, lo cual aumenta el costo del terreno, el piping, y el costo de bombeo).

Estos problemas se caracterizan por no poseer una única solución. En efecto, se arriba a un conjunto mínimo de soluciones no dominadas. Por lo tanto, decidir entre las mismas, lleva implícito subjetivamente la *preferencia* del diseñador respecto de los objetivos.

Aquí, enfatizamos específicamente el aspecto ambiental, de seguridad y confiabilidad operacional. Nótese que en efecto, en la actualidad se imponen crecientemente restricciones al diseño tal que minimicen el impacto al medio ambiente, o bien que minimicen el riesgo asociado a la operación del proceso, entre otros aspectos. Si ya es complejo diseñar un proceso minimizando costos contemplando solo aspectos estructurales y de diseño, entendiéndolo por éstos a las variables estructurarles, intensivas y extensivas asociadas al mismo; más lo es si contemplamos la controlabilidad, la seguridad, operabilidad, confiabilidad, etc.

Dado que los actuales procesos resultan sofisticados -ya que por ejemplo minimizan el consumo de energía a costa de introducir nuevos reciclados y equipos-, se complica relativamente la controlabilidad y la puesta en marcha y parada. También el mantenimiento, ya que

deben introducirse elementos preventivos para protegerse de potenciales situaciones anómalas (unidades en paralelo). En síntesis, resulta muy complejo tratar el problema globalmente, por lo que se recurre, como se ha mencionado, a la partición del problema en subproblemas más razonables para enfrentar su solución.

Dentro de este contexto, en el caso de los aspectos a optimizar, se recurre a considerar prioritariamente los costos de inversión y los costos de operación -el consumo energético entre otros-. Los demás aspectos (tales como la controlabilidad, operabilidad, seguridad, impacto ambiental, entre otros) se contemplan generalmente en sucesivas etapas o se incorporan al problema directamente como restricciones y no en la función objetivo.

Dentro de este contexto, el problema desde el punto de vista de la programación matemática en forma general resulta de la forma:

Optimice  $\{f(\underline{x})\}$

Sujeto a:

$$h(\underline{x}) = 0$$

$$g(\underline{x}) > 0$$

El vector  $\underline{x}$  comprende variables o parámetros de operación y variables estructurales. La función objetivo (FO) a optimizar  $f(\underline{x})$  (minimizar o maximizar), en la mayoría de los casos contempla los costos totales, cuya mayor contribución proviene de los costos de inversión y de operación. Una característica muy importante a tener en cuenta respecto de la FO a plantear en la tarea de diseño, refiere a su facilidad de ser representada (o modelada) matemáticamente.

Las funciones  $h(\underline{x})$  expresan generalmente las restricciones correspondientes a los balances de materia y energía, mientras que las restricciones  $g(\underline{x})$  representan restricciones de desigualdad y expresan por ejemplo zonas de operación factible. Por ejemplo, las composiciones/concentraciones y las temperaturas absolutas deben ser positivas, o bien restricciones propias del proceso, tales como temperaturas o presiones inferiores a un valor determinado, etc. Además, pueden existir diversas restricciones que provienen de la normativa ambiental o de seguridad (condiciones de temperatura, presiones límites, -temperaturas máximas admisibles, presiones de operación seguras, límites a las emisiones al ambiente, etc-).

Por último, la complejidad del problema también depende del tipo de variables que se utilicen para el modelado u objetivos a considerar para el proceso. En efecto, si bien existen objetivos expresables como funciones matemáticas (ya sean continuas, discontinuas o discretas), existen aquellos que no pueden ser representados bajo esta perspectiva fácilmente (por ejemplo en los procesos batch). Por otra parte, si se deben representar estructuras -variables estructurales que por ejemplo indican la presencia (o no) de un equipo en el el flowsheet- se recurre a utilizar variables enteras -en este caso binarias - 0 no está presente- o -1 está presente -) complicando el modelo resultante.

Hemos mencionado que existen numerosas variantes para el armado del diagrama de flujo de un proceso determinado, como así también, numerosas posibilidades para la asignación/especificación de las variables de operación y parámetros de los equipos. El diseñador deberá optar por alguna estrategia de modelado viable, de manera tal de optimizar la estructura resultante en función de los distintos aspectos funcionales a considerar. Nótese que cualita-

tivamente, este problema no es distinto al que enfrenta un arquitecto al diseñar un edificio para ciertos fines, o un ingeniero electrónico al diseñar un circuito para determinado objetivo.

### *III. EVOLUCIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PROCESOS QUÍMICOS. SEGURIDAD. SUSTENTABILIDAD DE PROCESOS*

Históricamente, los aspectos técnicos y económicos fueron prácticamente las únicas consideraciones en el diseño de plantas de procesos químicos. Diferentes aspectos como la sostenibilidad, el medio ambiente, la salud y la seguridad han ganado recientemente una atención significativa en el diseño y desarrollo de plantas de procesos. En los últimos años, surgieron distintas estrategias para considerar alguna métrica del riesgo asociado a las diferentes etapas de diseño desde la ingeniería conceptual. La utilización de la seguridad inherente como herramienta de toma de decisiones durante el ciclo de vida de una planta química se ha identificado como una técnica confiable para producir una planta más segura, sustentable y económica.

Se reportaron distintas metodologías para implementar o facilitar estrategias de diseño bajo este nuevo paradigma (intensificación o minimización, sustitución, atenuación o moderación, limitación de efectos, simplicidad, evitar efectos en cadena, entre otras). El enfoque de *diseño inherentemente más seguro* (DIS) se está convirtiendo en una metodología clave para el diseño de plantas de procesos. Muchos autores resaltaron la necesidad de realizar un diseño seguro contemplando cada una de las etapas de diseño:

- de investigación y Desarrollo (I+D),
- de ingeniería preliminar,
- de ingeniería básica,
- de ingeniería de detalle.

En general, las herramientas utilizadas en las primeras etapas (I+D, ingeniería preliminar y gran parte de la ingeniería básica) recurren a la utilización de índices que cuantifican indirectamente el riesgo asociado a distintas alternativas de diseño. Ahora bien, en la etapa del diseño del layout, luego de la definición de los P&ID, resulta claro que deben utilizarse métodos que cuantifiquen directamente las consecuencias o bien el riesgo asociado al propio diseño.

#### *III.1 Rol del Layout en la Seguridad*

El (DIS) intenta evitar o eliminar los peligros, o reducir su magnitud, gravedad o probabilidad de ocurrencia a lo largo del proyecto de diseño. Khan et al. (2003) enumeraron un conjunto de principios tales como limitar las consecuencias de un posible evento accidental (mediante la segregación de unidades por ejemplo) y prevenir el efecto dominó (mediante el uso de un mayor espacio de separación entre equipos al diseñar el layout). El efecto dominó se define como el escalamiento de los efectos de un accidente (incendio debido a fuga del contenido de un tanque, por ejemplo) al provocar una nueva fuga en un tanque adyacente, originando un incendio adicional. Nótese que esta cadena, en principio involucrando dos unidades, puede extenderse, según la magnitud del primer evento desencadenante, y las características de las unidades adyacentes y sus posiciones relativas (layout de planta).

En los principios de seguridad inherente propuestos por Kidam et al. (2016), evitar o minimizar los peligros suelen ser las dos opciones viables para lograr un nivel de *riesgo tolerable*. Dentro de este contexto, destacan que para minimizar el riesgo la distancia entre las uni-

dades es de vital importancia al estar íntimamente relacionadas con la probabilidad de ocurrencia del efecto dominó -escalamiento- (Athar, Shariff, & Buang, 2019).

*El establecimiento de distancias mínimas entre los equipos del proceso minimiza el efecto de las consecuencias de eventos accidentales en las unidades cercanas. Mientras menor la distancia entre los equipos, más compacto el layout, aumentando así la densidad de las unidades, y consecuentemente las posibilidades del efecto dominó.*

Puede observarse aquí el contrapunto que surge naturalmente entre el riesgo y los costos. A mayor distancia entre las unidades, las consecuencias de un potencial evento accidental sobre la segunda serían menores y, por lo tanto, también la probabilidad que se manifieste el potencial efecto dominó. En contraposición, aumentar las distancias implica un aumento en los costos asociados al layout, ya que se incrementan tanto los costos del terreno, tuberías adicionales y costos operativos (Mannan, 2012).

Existen lineamientos disponibles en la literatura para la ubicación de los equipos de proceso para diseñar el layout de la planta. Sin embargo, estos lineamientos sólo establecen el requisito de la existencia de distancias mínimas. Las distancias requeridas para el layout de planta de cualquier proceso específico no están disponibles en la literatura abierta (Athar, Shariff, & Buang, 2019).

Normalmente, el análisis del layout de la planta se realiza en las últimas etapas de diseño. Sin embargo, esto trae aparejada la necesidad de diseños iterativos y recurrentes del layout; lo cual, desde el punto de vista operativo implica un gran esfuerzo de ingeniería y además, dificulta la posibilidad de la obtención de diseños óptimos. Nótese que estos ciclos iterativos son independientes (se adicionan) a los mencionados ciclos clásicos de la ingeniería preliminar (síntesis, análisis -simulación / optimización.. síntesis..).

Nótese además, que el layout de planta, si bien es un plano que muestra la posición relativa de los equipos y otros componentes de proceso, oficinas, edificios, etc.; no es lo mismo que el flowsheet (plano del proceso) ni el P+I+D, según hemos visto. Aunque están íntimamente relacionados cada uno de ellos entre sí.

Es ampliamente conocido que el diseño del layout juega un papel fundamental en la seguridad de una planta química. La principal característica que contribuye a la seguridad inherente radica en la definición de *distancias de seguridad apropiadas*. Estas distancias se definen desde las unidades potencialmente peligrosas, ya sea hacia las zonas frecuentadas por el personal (o las inmediaciones de la planta), como así también entre las distintas unidades para prevenir el efecto dominó y las pérdidas económicas en el caso de un potencial evento accidental. Las distancias de seguridad deben garantizarse en general entre diferentes tipos de unidades:

- (1) una unidad de un grado particular de peligro y
  - (a) otra unidad del mismo grado
  - (b) otra unidad de menor o mayor grado de peligro
- (2) entre una unidad de proceso y:
  - (a) una unidad de almacenamiento
  - (b) unidades de carga y descarga
- (3) entre unidades de almacenamiento adyacentes que contengan materiales de diferente inflamabilidad

- (4) entre una unidad y:
  - (a) edificios ocupados
  - (b) posibles fuentes de ignición
  - (c) un límite de planta.

### *III.2 Seguridad en la Optimización del Layout. Diseño Inherentemente mas Seguro, Diseño Basado en Riesgos*

En los modelos de optimización de layout que han sido publicados a la fecha, la seguridad (o alguna métrica del riesgo) ha sido considerada utilizando distintos enfoques. Una alternativa viable que ha sido utilizada para la consideración de la seguridad ha sido la utilización de distancias fijas de separación entre las unidades de proceso.

Históricamente, estas distancias han sido obtenidas básicamente según tres enfoques: el primero y más tradicional consiste en utilizar distancias estándares desarrolladas por la industria o normativas. Lewis (1980) y Mannan (2005) afirman que las distancias mínimas de separación dadas en los códigos y estándares son distancias mínimas absolutas y no son necesariamente una buena práctica para nuevas instalaciones.

El segundo enfoque consiste en aplicar métodos basados en índices para decidir la separación requerida (por ejemplo, el Dow F&EI). El tercero se fundamenta en la estimación de una separación adecuada basándose *en un cálculo de ingeniería para cada caso particular*. Esta última alternativa resulta la más apropiada, pero en general estas distancias deben estimarse mediante complejos modelos ejecutados previamente a la ejecución del modelo de optimización del layout (etapa de preprocesamiento o fuera de línea “offline”). A través de esta alternativa es factible aproximarse a un Diseño Inherentemente más Seguro, al establecer distancias de separación conservadoras y fundamentadas para cada diseño en particular -por ejemplo, contemplando el peor caso, esto es, el accidente con mayores consecuencias dentro de las opciones posibles de ocurrir-. En efecto, la determinación (adopción) de cierta distancia de separación estimada de esta manera, es una *protección pasiva que proporciona un factor de mitigación robusto, independiente de otras circunstancias ambientales o de funcionamiento del resto del proceso, en caso de deterioro en la gestión de la planta frente a anomalías de importancia*.

Sin embargo, esta estrategia no puede aplicarse en todos los casos. Por ejemplo, no son iguales escenarios accidentales cuyo desarrollo se manifiesta en un *pool fire* (fuego de charco o pileta) en el cual el frente de llama, aun en escenarios industriales (diámetros de cientos de metros) genera un campo de radiaciones cuya consecuencia relevante en equipos de proceso no suele ser de magnitud inmanejable. No obstante, ante eventos catastróficos (BLEVE -una explosión a alta presión con consecuencias a distancias muy grandes-, dispersión de tóxicos, explosiones de nube de vapor, eyección de fragmentos como producto de una explosión, entre otros); dado que las distancias de impacto son del orden de los cientos de metros hasta kilómetros, en general es necesario introducir la probabilidad de ocurrencia de los eventos accidentales. De tal forma de contemplar una medida del riesgo (recordar que es el producto de la frecuencia de ocurrencia por la severidad de las consecuencias medidas en unidades homogéneas) y simultáneamente obtener distancias de separación prácticas -realistas- a la hora del diseño del layout (diseño basado en riesgos). Esto es, se fijan niveles de riesgos “tolerables” y a partir de dicha magnitud se determina la distancia de seguridad entre los equipos y respecto

de los otros actores relevantes dentro y fuera de la planta (población, rutas, otras plantas vecinas, etc).

Dentro de este contexto, diversos autores propusieron metodologías considerando la probabilidad de ocurrencia para distintos eventos accidentales, por ejemplo dispersión de tóxicos, explosiones o incendios de magnitud. Han sido reportadas, además, combinaciones de las estrategias mencionadas.

Sin embargo, es importante señalar que las metodologías actuales para resolver problemas de optimización de layout de plantas en general, padecen de diversas carencias si se pretende resolver problemas realistas considerando el cálculo del riesgo. Es posible mencionar varios factores limitantes, entre los cuales pueden citarse el crecimiento combinatorio exponencial del problema de optimización a resolver, en función del número de unidades de procesamiento (UP) a contemplar; y la complejidad asociada a la inclusión del modelo necesario para el cálculo de la vulnerabilidad del entorno, entre otros factores.

En definitiva, para el diseño del layout es necesario considerar alguna métrica del riesgo, que generalmente implica generar las matrices de distanciamientos que especifican distancias mínimas requeridas entre todos los equipos entre sí y el resto de los elementos vulnerables que componen el complejo fabril y sus alrededores. Ahora bien, la definición de dichas matrices para considerar las consecuencias de los potenciales eventos accidentales no es trivial, sino que, por un lado, existen según mencionamos distintas filosofías de diseño para su definición (Diseño Inherentemente más Seguro -DIS- o Diseño Basado en Riesgos -DBR-) y, por otro, no existen métodos ampliamente aceptados o fáciles de utilizar para su determinación.

Resumiendo, en general, a partir de estas metodologías de diseño ampliamente difundidas -DIS y RBD- surgen dos estrategias diferenciadas para la estimación de distancias de seguridad. Por un lado, según mencionamos, mediante un análisis de consecuencias (efecto del evento accidental sobre el entorno), es factible la estimación de la distancia de seguridad mediante el establecimiento de valores umbrales (thresholds) en el impacto ocasionado en las instalaciones, considerando el peor escenario. Dicha estrategia está directamente ligada a la filosofía de Diseño Inherentemente más Seguro. La distancia obtenida es un factor de protección pasivo, ya que asegura que no existan daños intolerables sobre los elementos circundantes ni posibilidades creíbles de propagación por efecto dominó. En otras palabras, *la aplicación del concepto de DIS a la definición de distancias mínimas entre unidades implicaría la definición de éstas de modo que, ante un evento accidental, los impactos sobre los receptores sean lo suficientemente bajos evitando daños intolerables sobre los mismos y por ende limitando el efecto dominó (propagación del evento primario escalando los efectos ya sea sobre las personas o el ambiente -en sentido general- circundante).*

Por otro lado, dadas las limitaciones que presenta esta metodología, principalmente vinculadas a la obtención de distancias sumamente grandes (impracticables industrialmente) ante eventos catastróficos -que a su vez son eventos accidentales de frecuencias de ocurrencia muy bajas, por ejemplo, ante explosiones BLEVE, de nubes de vapor, entre otras-. En estos casos *es factible la aplicación de la estrategia de Diseño Basado en Riesgos*. En este caso, dada la definición general de Riesgo (Riesgo = Frecuencia de Ocurrencia x Consecuencia), definido un umbral para el “riesgo tolerable”, y conocida la frecuencia de ocurrencia de los eventos, las distancias seguras resultan aquellas debidas a las cuales las consecuencias sobre los receptores

se derivan de la combinación de ambos valores (el riesgo tolerable y la frecuencia de ocurrencia).

Luego, de manera similar a lo establecido para la estimación de *distancias de seguridad fijando umbrales solo basados en el impacto sobre los potenciales receptores*, es factible el establecimiento de éstas fijando valores umbrales *al riesgo tolerable*.

A pesar de los métodos existentes a la fecha para la consideración de la seguridad en las distintas etapas de diseño, aún se manifiesta una carencia importante de modelos adecuados que vinculen las variables críticas de diseño y la estimación de distancias de seguridad (*DS*). En la bibliografía se encuentran disponibles modelos rigurosos de diferente complejidad para evaluar las consecuencias de eventos accidentales, tales como incendios, explosiones, dispersión de tóxicos, entre otros. *Éstos son apropiados y suelen usarse en las etapas finales del diseño para el análisis de consecuencias y/o riesgo*. Sin embargo, no son aplicables en las primeras etapas de diseño, para ser incorporados a los modelos utilizados en la ingeniería conceptual (simulación, síntesis, optimización).

Por lo tanto, si bien existen distancias generales recomendadas por diversas normativas, la estimación de distancias de seguridad para cada caso particular es compleja, si se pretende obtenerlas en las primeras etapas de diseño, ya que los datos disponibles son escasos y los modelos rigurosos existentes exigen el diseño de todas las instalaciones involucradas (que solo es posible en las etapas finales del proyecto de diseño).

La disponibilidad de modelos simplificados para la estimación de distancias de seguridad no sólo es beneficiosa desde el punto de vista del diseño, sino también desde el punto de vista de la gestión. De hecho, los estándares API RP 580 (2016) y API RP 581 (2016) proporcionan procedimientos conceptuales y cuantitativos para definir programas de inspección (para el mantenimiento preventivo, por ejemplo) utilizando métodos basados en el riesgo asociado, por ejemplo, para procesos petroquímicos, entre otros. El primer estándar se centra en definiciones y conceptualizaciones, abarcando una descripción completa de los requisitos para establecer intervalos de inspección siguiendo una metodología de Inspección Basada en Riesgos (Risk Based Inspection -RBI-). El segundo describe metodologías para el análisis cuantitativo de riesgos (QRA - Quantitative Risk Analysis) para cada unidad de un proceso. El análisis de consecuencias siguiendo la API RBI se realiza para establecer un ranking de equipos en función del riesgo (para establecer prioridades para los programas de inspección). En el marco de la API RBI, las consecuencias provocadas por accidentes debido a las pérdidas de contención (Loss Of Containment -LOC-) se expresan como el área de impacto afectada mediante la fijación de umbrales al nivel de impacto -por ejemplo niveles de sobrepresión, o de intensidad de radiación, o concentración de tóxicos-. El área afectada se determina mediante dos métodos que se diferencian por su complejidad: el análisis de consecuencias de nivel uno se realiza utilizando métodos simplificados para estimar las zonas afectadas por un número limitado de sustancias peligrosas, y el análisis de consecuencias de nivel dos implica un análisis de consecuencias riguroso para resolver las deficiencias del primero. Estas deficiencias se mencionan en gran medida en API RP 581 (2016).

#### *IV. OPERABILIDAD DE PROCESOS. POLÍTICAS DE MANTENIMIENTO BASADAS EN DISPONIBILIDAD. ESTUDIOS RAM*

Se ha mencionado que además del diseño (conceptual, de detalle), la ingeniería de procesos abarca también la *Operación de Procesos*. Esto es, operar la planta: puesta en marcha, parada, mantenimiento, seguridad, calidad, ambiente, supervisión del proceso (generalmente desde la sala de Control y mediante rondas con frecuencias establecidas de inspección), entre otros aspectos relevantes.

Se debe mencionar aquí que el término operación de procesos puede relacionarse con diversos aspectos en la ingeniería de procesos. Por ejemplo, si nos referimos a la operación segura de procesos en el marco de un proyecto de diseño (el proceso no existe en la realidad), obviamente nos referimos a asegurar que la planta cuando esté operando, *sea segura*. Para ello existen procedimientos y herramientas que nos provee la “Ingeniería de la Confiabilidad”, en particular los estudios de *Análisis de Riesgos*. *Este tema en particular será el objeto de la parte III de esta serie de apuntes.*

Como se verá, los estudios de análisis de riesgos se aplican tanto en la etapa de diseño, como durante la operación del proceso. Por ejemplo, para evaluar la seguridad de los procedimientos de puesta en marcha o parada. Como cualquier procedimiento operativo (inspecciones, la limpieza de equipos, etc..) se realizan durante la etapa de diseño. Tanto el diseño del proceso, como tales procedimientos, deben ser objeto de un análisis de riesgos *antes* de poner en marcha la planta, a los efectos de asegurar *una operación segura*. De ser necesarios, se resolverán todos los aspectos deficientes previamente a la puesta en marcha.

No obstante, luego de la puesta en marcha, y aún en la misma, pueden observarse deficiencias o anomalías que exijan un nuevo análisis de riesgos de la planta. Obviamente, cualquier modificación del proceso (ampliaciones, modificación de materias primas, nuevas fuentes de energía o modificaciones de cierta magnitud o relevancia) exigen un nuevo análisis de riesgos. Toda modificación al proceso, implica un análisis de riesgos.

Por otra parte, existen otros aspectos relevantes durante la etapa de operación de la planta, en su ciclo de vida útil. Por ejemplo, la evaluación de la Confiabilidad de los componentes, equipos, o del proceso completo, para cumplir con sus objetivos de operabilidad según lo especificado en la etapa de diseño. Este aspecto es crucial para la operación segura de los mismos. En general se acuña el término "estudios o análisis RAM" (Reliability, Availability and Maintainability analysis) -Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad-, para evaluar la confiabilidad, disponibilidad, o mantenibilidad de los procesos.

Si bien el mantenimiento, por ejemplo se realiza durante todo el período de operaciones o vida útil de la planta; obviamente, también resulta clave contemplar dichos aspectos *durante el diseño del proceso*, para asegurar un comportamiento adecuado del mismo durante su ciclo de vida útil. *En la Parte IV de esta serie de apuntes, se profundizará sobre tales aspectos y su aplicación al diseño y operación de los procesos químicos.*