

Diseño, Simulación, Optimización y Seguridad de Procesos

Dr. Nicolás José Scenna

Dr. Nestor Hugo Rodríguez

Dr. Juan Ignacio Manassaldi

Tecnología, Ingeniería Química e introducción a la Ingeniería de Procesos. Parte I

Introducción general a la Asignatura.

Ingeniería. Ingeniería Química. Ingeniería de Procesos

Dentro del contexto en el cual debe desarrollarse la asignatura, nos preguntamos, *¿Qué es la ingeniería?*. Es una profesión, y como tal, en un marco colectivo o social, se define su campo de acción, su ejercicio y aspectos de ética profesional; entre otras cuestiones relevantes para cada actividad. La sociedad reconoce a cada profesional como idóneo en los campos / áreas de incumbencia fijados, definiéndose un cuerpo normativo que regula el ejercicio profesional. La normativa difiere según distintos países o incluso en diferentes estados en el mismo país.

La ingeniería, como profesión, está íntimamente ligada a la tecnología?

Tanto como que el ingeniero es hacedor y/o gestor/operador de tecnologías.

En general podemos definir a la tecnología, en un sentido amplio, como una herramienta por medio de la cual se transforma el mundo natural en artificial. Es decir, es una herramienta que conlleva intencionalidad, según los designios del humano como creador de tales tecnologías. La ciencia, en su dimensión seminal, no pretende más que generar conocimiento verdadero. Su objetivo es lograr algo que por axioma de la propia actividad científica es inalcanzable: la obtención de la totalidad de todo el conocimiento. Si esto fuera posible, entonces en algún momento la ciencia dejaría de ser tal, o de otro modo, dejaría de existir.

La tecnología es producto del conocimiento disciplinar (ciencia) en conjunción o fusión con la técnica, el juicio creativo y la experiencia (conocimiento tácito). Un hecho importante es que la tecnología en la actualidad evoluciona rápidamente, en una suerte de “aceleración histórica” cuyas consecuencias son difíciles de pronosticar.

La tecnología no es neutra como la ciencia, ya que ésta aspira a la generación de conocimientos. Hemos ya que hemos mencionado que la tecnología tiene intencionalidad. Al operar sobre (y modificar) la realidad o el mundo natural, tiene impactos sociales, culturales, económicos, políticos, militares, éticos, etc.....

La tecnología es una actividad de conjunto. Suele ser multidisciplinaria, inter o intradisciplinaria.

La tecnología se crea (invención-innovación), se proyecta (diseña), se adapta, se

compra, se vende, se selecciona, se construye, se opera, se desmantela.....

Todas estas actividades son realizadas por técnicos, tecnólogos e ingenieros. Son las empresas públicas o privadas, individuos o ciertas instituciones, las que siguiendo las reglas del mercado, o en el marco del mismo, producen, adaptan, compran y venden, usan u operan tecnologías. Es decir la tecnología es una “mercadería” mas....

Dado el conocimiento se genera continuamente (disciplinar o científico, técnico o derivado de la experiencia, incorporados en los aparatos, procesos, procedimientos de operación y logística, productos, manuales descriptivos); las tecnologías, productos, marcas, procesos, son objeto de protección para asegurar una rentabilidad por medio de la exclusividad de la explotación por un tiempo determinado, según cada país disponga en su cuerpo normativo; aunque debe remarcarse que también existe normativa consensuada internacionalmente.

Entre otras, las formas clásicas de protección son las siguientes

Patentes

Marcas registradas

Propiedad intelectual

El mercado es el marco referencial, quien manifiesta su veredicto, para que una tecnología o producto sobreviva o sea reemplazada por otra. Lo normal es que periódicamente surjan nuevos procesos o productos, por presión de la competencia que deriva en innovaciones que a la larga, por ser más eficaces en algún aspecto según la percepción del consumidor, desplazan a las tecnologías competidoras existentes.

Para permanecer en el mercado es necesario no solo producir, sino vender y obtener beneficios, para asegurar reinversiones, por lo que existen diversas actividades vitales tales como: *diseño, producción, publicidad, logística, distribución, compras, ventas, almacenamiento, control de calidad, seguridad, mantenimiento, supervisión, cuidado del ambiente, atención al cliente, posventa, etc.....*

La clave actualmente es ser innovador. La innovación es la regla en la economía actual. No siempre un problema o necesidad puede resolverse con una sola tecnología.

No existe una única tecnología para una dada demanda: Influye la cultura, la región geográfica, la disponibilidad de materias primas, el entorno, la organización social y política, entre otros factores.

Luego, suele existir una tecnología apropiada para cada necesidad

Es por ello que es importante diseñar, optimizar, modificar procesos y disponer de herramientas que permitan evaluar numerosas alternativas para tomar decisiones ante este mundo globalizado y con una presión creciente de la competencia en todos los campos... Además, la aceleración de la conjunción ciencia – tecnología, o investigación, desarrollo e innovación, revoluciona aceleradamente el sistema socio-tecnológico-cultural-económico global.

Por ejemplo, la evolución de las herramientas para el cálculo numérico (del ábaco a la primera computadora y los dispositivos actuales), o el surgimiento de tecnologías para el almacenamiento de datos y/o el procesamiento veloz de información y la comunicación, han sido acompañados por transformaciones que plantean nuevos enfoques. Cobran una importancia fundamental en el aumento de la productividad (eficiencia, eficacia, optimización de recursos). Ya no basta con producir; debe hacerse a

una relación costo/prestación mínima. De lo contrario, se es muy vulnerable a la competencia, que existe ya o existirá muy probablemente en el futuro cercano.

Dentro de este contexto, al analizar la historia de la computación; predomina la historia de la ciencia o de la técnica?

Muy sucinta y superficialmente, podríamos decir que existen épocas/generaciones en la historia del cálculo y las herramientas de cómputo:

Primera época: del ábaco a las máquinas de oficina.

Segunda: las computadoras.

Tercera: cálculo numérico y simbólico. Miniaturización, velocidad e interconectividad

Cuarta: *Inteligencia Artificial*, capacidad formal para procesar encadenamientos lógicos y obtener conclusiones válidas según diversos campos de aplicación...

Puede contemplarse una nueva etapa de aplicaciones masivas a todas las actividades humanas.

En cuanto a las generaciones o tipificación de la herramienta computacional:

Primera generación

- Tubos de vacío
- Programadas en Lenguaje de máquina
- Grandes y muy costosas

Segunda Generación

- Circuitos de Transistores
- Programadas en lenguajes de alto nivel

Tercera Generación

- Circuitos Integrados
- Control a través de Sistemas Operativos

Cuarta Generación

- Microprocesadores
- Primeros Microcomputadores

Quinta Generación

- Microelectrónica.
- Competencia internacional por el dominio de la informática.
- Internet se masifica.
- Computadores portátiles y reducción creciente de tamaño.
- Computación Cuántica

Actualmente, se vislumbra una nueva generación de computadores. Comienza a emerger de la órbita de la investigación científica y comienza la aplicación concreta de la tecnología de la computación cuántica, que supone una mejora superlativa en la velocidad de cómputo respecto del estándar existente.

Tecnologías de la Comunicación (TICs):

Plantean nuevos enfoques que contemplan la tecnología de la información y comunicación como una actividad interpretativa, donde el significado, la comunicación, el lenguaje, las percepciones... cobran una importancia fundamental.

Se masifican los microcomputadores, con gran capacidad de procesamiento y cálculo. Se integran como parte de la mayoría de los artefactos / tecnologías, tales como electrodomésticos, automóviles, estructuras edilicias, procesos, sistemas de control y

supervisión y aún integrados a la vestimenta, en ciertos accesorios y al cuerpo humano en sí. Hace bastante tiempo que resultan accesibles: PC, tablet, notebook, celular inteligente y dispositivos miniaturizados, como cualquier electrodoméstico.

Estos elementos han cambiado profundamente el modo de vida y de trabajo de los seres humanos. Una persona sin conocimientos informáticos ha llegado a ser considerada inculta (tecnológicamente). En la práctica, el avance de las Tecnologías de la Información y de la Comunicación (TIC) revoluciona la forma en que se transmite, sistematiza, elabora y difunde la información y se organiza el trabajo, el modo en que se generan conocimientos y se diseña o se opera la tecnología, la actividad de creación de los artistas, la estética en el diseño....

Esta es una revolución de alcance global. Este fenómeno es compartido y se realimenta en otras áreas de la ciencia (transdisciplinariedad).

Por ejemplo: Genética (clonación, vacunas basadas en manipulaciones genéticas), Biología molecular, Biotecnología (cultivo de células animales, tejidos, células madre.....), Neurociencias, nuevas drogas..., Bioelectrónica, biomecánica, híbridos (biochip, cyborgs, bio-prótesis inteligentes.....)

Dado el estado de situación o evolución científico-tecnológica, puede proyectarse o suponerse factible (ya lo es claramente la modificación de especies diversas) la modificación de “La Especie” -la naturaleza humana, tal como la conocemos-. Solo basta tener en cuenta la evolución en el desarrollo de Bio-chips, neuro-computadoras, robótica e inteligencia artificial, cyborg (fusión hombre-máquina), clonación, Ya no suele tomarse como ciencia ficción lejana...el suponer la creación del Superhombre..... ¿nueva especie?... Por el contrario, se manifiesta cierta credibilidad en tales futuros y se consolidan numerosos llamados a la ética y la moral para no desarrollar proyectos de investigación en este sentido; al igual que la progresiva sanción de normativas para prohibir el planteo de tales proyectos y/o la asignación de fondos para desarrollarlos.

Dentro de este contexto, en las ciencias humanísticas se plantean nuevos dilemas:

¿Filosofía de lo natural o de lo artificial?

¿Humanismo o transhumanismo?

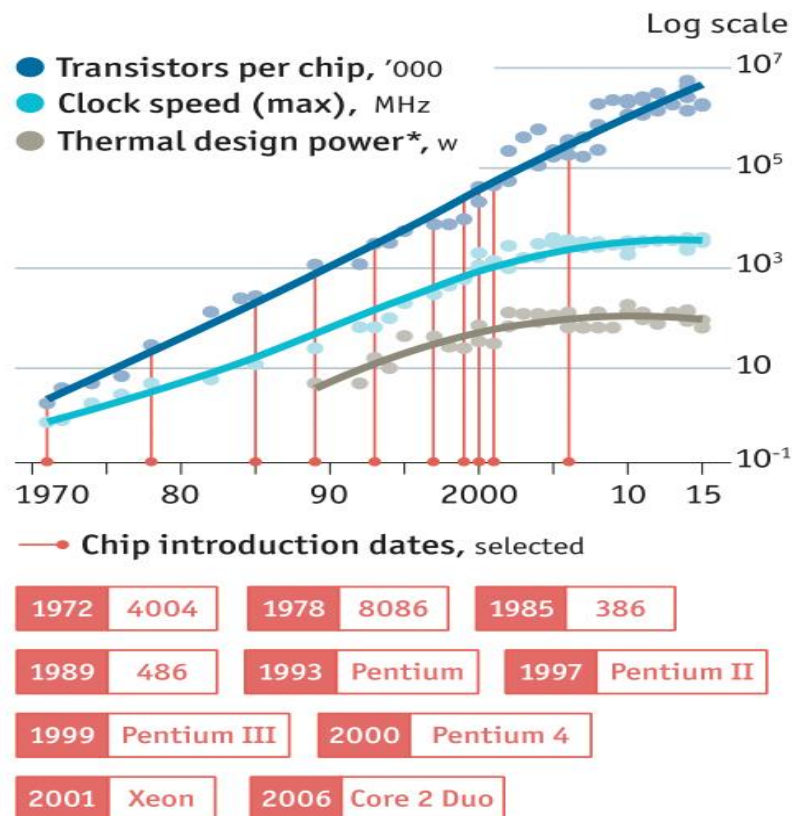
Si bien algunas dicotomías, al presente, no pasan de la especulación, es interesante analizar ciertos hechos con base científica o en base a los datos experimentales. Gordon Moore (19/04/65) publicó un artículo en el cual postulaba que la complejidad de los circuitos integrados se duplicaría cada año con una reducción de costo creciente. Se conoce ahora como la ley de Moore. El citado autor actualizó dicha “ley” en 1975 afirmando que el número de transistores en un chip se duplica cada dos años y esto se sigue cumpliendo hoy.. La ley de Moore nos explica cómo aumenta la complejidad de los chips (transistores contenidos en un chip) y anticipa una disminución de costos (y de tamaño) para lograr la misma tarea o eficiencia. En efecto, los microprocesadores en la actualidad se utilizan en todos los artefactos en los que sea posible, debido a su bajo costo relativo.

La ley de Moore no es una ley en el sentido científico, sino una observación empírica, que ha sido verificada hasta ahora experimentalmente, ya que durante los últimos 40 años la capacidad de los circuitos integrados se ha duplicado cada dos años. Sin embargo, se plantearon varios factores que amenazan la validez de esta regla desde

hace aproximadamente una década. Por un lado pueden citarse la cantidad de calor generado por los circuitos, el tamaño de las conexiones -cuyo límite aceptado es de solo 10 átomos- y los efectos cuánticos -los transistores de última generación tienen un tamaño de unos 100 átomos y según se reducen se dificulta asociar un cambio de estado representando ceros y unos, las unidades básicas de cálculo binario-. Por otro lado, vencer estas limitaciones puede involucrar crecientes inversiones debido al costo del desarrollo, el cual luego debe ser amortizado mediante el retorno en ventas y su consecuente rentabilidad.

La investigación y desarrollo reciente ha pasado por vencer relativamente estas problemáticas mediante líneas de desarrollo bastante prometedoras. Se asegura entonces muy probablemente la velocidad de desarrollo del área; permitiendo la posibilidad que tal evolución siga respondiendo a la ley de Moore.

En la figura siguiente se muestra la evolución de los parámetros asociados a la ley de Moore y los que se consideraban su limitante.



Evolución del nro de transistores por circuito, velocidad reloj interno y consumo máximo de energía seguro. Se indican fechas de aparición de las generaciones de procesadores (fuente: The Economist).

Mientras tanto, para ciertos autores (de disciplinas tales como la filosofía, sociología, epistemología), a pesar de que el progreso tecnológico se ha acelerado, se ha visto limitado por la inteligencia básica del cerebro humano, que no ha tenido un cambio significativo durante los últimos milenios. Postulan que una alternativa sería el constante aumento del poder de cómputo de las computadoras y otras tecnologías, que probablemente puedan sentar las bases para la construcción de una máquina más

inteligente que el ser humano y colaborar en la solución de problemas. También se ha postulado desde hace décadas que entre otras posibilidades, esto se podría lograr mediante un híbrido logrando una inteligencia sobrehumana -amplificación de la inteligencia humana, hibridizándola con la máquina/inteligencia artificial-, o solo mediante máquinas inteligentes. En cualquier caso, se podría disponer así (según esta postura) de mayor capacidad para la resolución de problemas y de habilidades inventivas respecto de la que los humanos actuales somos capaces de lograr. Sería posible entonces, lograr un cambio cualitativo, y de consecuencias impredecibles.

Para algunos autores, como Ray Kurzweil, es de crucial importancia el punto en el tiempo en el cual se logre que la potencia de cálculo de los ordenadores supere al de los cerebros humanos (inteligencia artificial sobrehumana). Postuló -basándose en la ley de Moore y otras semejantes para diversas tecnologías- una fecha en el entorno del año 2050. Se le ha llamado “la singularidad tecnológica”, ya que según esta visión, se revolucionaría la vida y la organización socio-cultural-económica tal como la conocemos.

No obstante, se plantearon muchas dudas a esta posibilidad. Las más relevantes, se basaban (y con razón en su momento), en las limitaciones planteadas a la validez a futuro de la ley de Moore; y por lo tanto, la dificultad de lograr aceleradamente los cambios tecnológicos integrales o las condiciones necesarias para llegar a la “singularidad”. Se consideró que el logro de tales condiciones era imposible, o bien que solo posible en un futuro lejano. Sin embargo, más arriba comentamos el incipiente éxito respecto de lo que hace muy poco se consideraba imposible “el progreso y aplicaciones reales de la computación cuántica”. Ergo, la ley de Moore pareciera que podría seguir incólume. Con lo cual, las posibilidades asociadas a la verosimilitud de la singularidad, no son nulas.

Dentro de este contexto, es notorio a partir de la última década, la percepción -o el impulso masivo- de las aplicaciones de la Inteligencia Artificial en todos los aspectos de las actividades humanas. También se han logrado avances impresionantes en las neurociencias y en la neurocirugía, habiéndose implantado conexiones en el cerebro y distintas terminales nerviosas de diversas musculaturas dañadas para recuperar movilidades/funcionalidades corporales; mediante una complementación entre el cerebro y el sistema neuronal en la recepción/procesamiento/transmisión de señales logrando un híbrido entre un implante artificial y la red neuronal cerebral. Esto, más que invalidar, permite imaginar la posibilidad futura de la potenciación humana mediante procesadores híbridos integrados al organismo.

Sea como sea, lo importante es notar que el avance de la tecnología en todas sus ramas es muy importante, e impacta en el desarrollo de todas las disciplinas de la ciencia, y de las profesiones, y en particular de la ingeniería. *Dado que la duración promedio de las carreras de ingeniería en nuestro país está en el orden cercano a la década, no es menor esta cuestión. El estado tecnológico característico en un área científico-tecnológica cualquiera, puede ser bastante distinto al egresar que al ingresar a la Universidad.*

Luego, podemos concluir que la aceleración del “tiempo histórico” es un hecho. El “driver” o fuerza impulsora es el avance científico y tecnológico. Surgen aceleradamente nuevas tecnologías. Aparecen nuevas “ingenierías” o bien se rediseñan

las existentes... por lo que la formación general del ingeniero debe contemplar, estar acorde, con estas consideraciones.

La Ingeniería Química y la Evolución Tecnológica

Es interesante remarcar la evolución de la ingeniería química. Como disciplina, en sus orígenes, era básicamente una extensión de la ingeniería mecánica aplicada a resolver los problemas de fabricación de sustancias y materiales químicos, tarea tradicional de la química industrial. En contraste, la ingeniería química moderna está estructurada alrededor de un sistema de conocimientos propio acerca de fenómenos y procesos vinculados con la producción de sustancias y materiales mediante cambios en las propiedades físicas, químicas, biológicas...

Algunos hitos importantes que se destacan en la bibliografía son los siguientes:

(1888)

L. M. Norton comienza un plan de estudios en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) orientado a Ingeniería Química.

(1901)

G. E. Davis publica el primer Manual del Ingeniero Químico.

(1908)

Se funda el Instituto Americano de Ingenieros Químicos (AIChE).

(1915)

En el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), Walker, Lewis y McAdams introducen la primera versión del concepto de Operaciones Unitarias -serie de operaciones comunes a muchos procesos industriales- (transferencia de energía, destilación, flujo de fluidos, filtración, trituración, molienda y cristalización). Esto permitió sistematizar el análisis, caracterizar los tipos de fenómenos involucrados y por lo tanto obtener sustento científico y leyes generales asociadas a las diversas operaciones/procesos de la Ingeniería Química.

(1919)

Universidad de Concepción (Chile): Se inicia carrera de Ingeniero en Química y Químico analista.

Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Química Industrial y Agrícola, Santa Fe, Argentina -actual Facultad de Ingeniería Química (FIQ)-, inicia la carrera de Ingeniería Química.

(1922)

Se funda la Institución Británica de Ingenieros Químicos (IChemE).

(1923)

Primer libro de texto de esta disciplina "Principios de Ingeniería Química", de Walker, Lewis y McAdams, MIT.

(1927)

Monografías sobre operaciones unitarias, como por ejemplo "Elements of Chemical Engineering" de Badger y McCabe

(1931)

Se publica el libro de texto “Industrial Chemical Calculations” de Hougén y Watson (1935 al 1950)

Se edita la primera edición del “Handbook of Chemical Engineering” de Perry y col.

Se publican los libros “Thermodynamics” de Hougén, Watson y Ragatz, “Chemical Engineering Thermodynamics” de Dodge, “Ingeniería de las Reacciones Químicas, de Hougén y Watson, “Unit Operations of Chemical Engineering” de Brown. En esta obra las operaciones unitarias aparecen ya agrupadas según el tipo de magnitud transferida, materia, energía o cantidad de movimiento.

(1960-80)

En la década del 60 se consolida una nueva visión metodológica o paradigma: con la aparición del libro “Fenómenos de transporte” de R. B. Bird y col. Se sistematiza el modelado de los sistemas, procesos y operaciones en ingeniería química, rescatando el análisis y estudio de los fenómenos físico-químicos tanto a escala micro como en los fenómenos macroscópicos. Se resalta el estudio de los fenómenos de transporte enfatizando el tipo de transferencia o transporte, resaltando las analogías y las metodologías comunes -cantidad de movimiento (Leyes de Newton), transferencia de calor (Leyes de Fourier) y transferencia de masa (Leyes de Fick)-. Se sientan las bases sistémicas para el modelado y el diseño en la ingeniería química.

Comienza, dado el crecimiento de la economía mundial y la demanda asociada, un sostenido aumento de la producción (que por la competencia debe siempre realizarse a un menor costo). Se diversifica la demanda y en respuesta surgen y consolidan nuevos procesos (producción de fármacos, alimentos, agua potable, energía, entre otros) que además implican no solo el desarrollo sino la especialización de la ingeniería química en diversas áreas.

Surge otro nuevo paradigma dentro de la ingeniería química denominado ingeniería de procesos, consolidando una visión de análisis sistémico. Se incorpora a la visión del modelado centrado en los fenómenos de transporte, la capacidad y velocidad de cómputo acompañando la evolución de las tecnologías informáticas, que permiten sistematizar la tarea de diseño no ya de las operaciones unitarias, sino de las distintas clases de procesos que van surgiendo dentro del campo de la ingeniería química. Esto se realiza en el marco de una visión sistémica, integral, que permite sentar bases metodológicas para la generación de las estructuras de los procesos (diseño), y de sus condiciones de operación. Para ello son muy importantes la incorporación del cálculo numérico y la utilización de los avances de la mecánica estadística para formular modelos para la estimación de las propiedades físico-químicas de sustancias puras y las potenciales mezclas posibles.

Se involucran nuevos conceptos y sistemas automatizados, (Ingeniería de control de procesos). Surgen los Controladores Lógicos Programables, PLC. Surge la Ingeniería en automatización y control industrial enfocado a la Industria Química y de Procesos.

Hacia fines de la década del 70 surgen las primeras aplicaciones de sistemas de Control Inteligente, Sistemas Automatizados, Control Digital, Sistemas Instrumentados

y de Adquisición de Datos, comenzando la incipiente incorporación de tales tecnologías en la Industria Química, con el objeto de incrementar la producción y la calidad.

(1980 en adelante)

En este período se consolida y profundiza el método de análisis sistémico de los procesos químicos (llamado *process system engineering*, o diseño sistémico de procesos, o ingeniería sistémica de procesos), contemplando la síntesis estructural y la evaluación (simulación – optimización), mediante herramientas computacionales. Esta visión está hoy consolidada, sin grandes cambios hasta la actualidad. Se han desarrollado las herramientas computacionales ganando eficiencia, masificándose su uso, expandiéndose globalmente. Surgen los sistemas CAD/CAM (diseño asistido por computadora y manufactura asistida por computadora) en todas las ramas y actividades de la ingeniería en general.

Desde el punto de vista de la seguridad, un gran avance teórico se produjo durante la segunda guerra mundial, ya que los primeros aparatos autónomos utilizados como armas (misiles) en los ensayos de prueba presentaban numerosas fallas, en general en el diseño de los diversos sistemas componentes. Para resolver tales problemáticas se avanzó teóricamente y prácticamente, sentando las bases de lo que hoy conocemos como ingeniería de la Confiabilidad. Luego, el diseño de diversas tecnologías (energía nuclear, espacial, entre otras) fueron adoptando y perfeccionando tales metodologías para el mantenimiento, el análisis de peligros y del riesgo asociado a la operación de procesos, el diseño seguro, entre otros. En la ingeniería química comienzan a incorporarse progresivamente (luego de numerosos eventos accidentales catastróficos), desarrollándose diversas metodologías según el campo de aplicación particular. La formalización de tales procedimientos y su aplicación comenzó en Inglaterra, aunque en la actualidad son de aplicación universal.

Un análisis interesante es observar el impacto de la evolución arriba mencionada en el ejercicio de la profesión de ingeniero químico. Una forma de hacerlo es tomando como referencia al *Manual del Ingeniero Químico*, ya que es una base concreta para el análisis de la variación de los contenidos y métodos asociados al ejercicio profesional a través del tiempo, reflejándose en el contenido de tal Manual según las distintas ediciones. Es claro que al proponerse nuevas visiones y nuevas metodologías teóricas, la difusión de tales procedimientos metodológicos lleva un tiempo, y si bien en la actualidad el mundo “está globalizado”, la dinámica de inserción internacional de los nuevos métodos o contenidos no es instantánea, ni homogénea, en el estado del arte del ejercicio profesional.

En general, el Manual del Ingeniero Químico se ha editado aproximadamente cada 10 años, elaborado por un conjunto de especialistas reconocidos en la profesión, que en el caso analizado se realizó bajo la dirección editorial de Robert H. Perry y Cecil H. Chilton desde sus comienzos.

Si bien como se ha mencionado más arriba, la primera edición se realiza en la década del 30, si nos centramos en la 5ta edición (década del 70) en forma muy sintética puede afirmarse que se aprecia una orientación estructural (la organización en capítulos) muy orientada a las operaciones unitarias, la presentación de datos fisicoquímicos y termodinámicos, de elementos de matemáticas (formulaciones y tablas), control, transporte de fluidos en distintos estados y generación de energía y transferencia de calor,

procesos de separación y otras operaciones unitarias, de materiales y fundamentos para la construcción y finalmente un capítulo referido a datos y métodos de estimación de costos. Es decir, se incorpora la visión metodológica acerca de los fenómenos de transporte y las operaciones unitarias, el diseño de procesos y los sistemas de control. Se brindan bases para resolver la problemática para el acceso a los datos necesarios para el diseño mediante la presentación de numerosas tablas y gráficas que permiten obtener datos de sustancias puras y de numerosas mezclas.

Paralelamente, no existen referencias concretas al diseño sistémico de procesos, o ingeniería sistémica de procesos, al igual que las tareas de síntesis, evaluación, simulación y optimización de procesos químicos. Por otra parte, no existen en el capítulo matemático una mención concreta al desarrollo de resolución de sistemas de ecuaciones por métodos del cálculo numérico, o bien la estimación de propiedades fisicoquímicas o termodinámicas por medio de ecuaciones específicas para tal fin; en particular para mezclas no ideales. Es decir, se depende en general de gráficas y tablas, más que de métodos de estimación generalizados que solo utilizan uno o unos pocos parámetros, lo cual permite sistematizar computacionalmente su cálculo. Esto es así ya que como se ha comentado, si bien incipientemente ya eran conocidas y publicadas en esta década las bases para tales metodologías, la incorporación de las mismas en un manual estándar del ejercicio de la profesión, lleva un tiempo.

Si se analizan las ediciones del mismo manual, realizadas en las décadas del 80, 90 y 2000, se observan diversos cambios en el conjunto de temáticas y metodologías incorporadas. Se incluyen desde la mención (y las respectivas referencias en el 80) hasta la incorporación de capítulos específicos para la simulación de procesos, el control avanzado y digital de procesos, los métodos de cálculo numérico (en la sección de elementos de matemática) y en las últimas décadas mencionadas, se incorporan métodos para el cálculo de propiedades termodinámicas y físico-químicas. En el 2010, por último, se incluyen además nociones de diseño seguro, diseño sustentable, intensificación de procesos, entre otros aspectos relevantes.

En este contexto, en el futuro mediato se esperan cambios muy profundos en cuanto al tipo de procesos y campos de acción de la ingeniería química; seguramente involucrando nuevas áreas de aplicación.

Por ejemplo, hemos visto que hace varias décadas bajo el enfoque o punto de vista sistémico, se ha introducido el término “operaciones unitarias” para sistematizar el conjunto de equipos/dispositivos que se utilizan generalmente para producir las transformaciones deseadas en función de los materiales de partida y los objetivos del proceso. Es importante aclarar, en el marco evolutivo descrito, que dada la innovación de los procesos, surgen continuamente nuevas “operaciones unitarias”. *No solo como efecto de la aparición de nuevos productos/procesos (por ejemplo la biotecnología), sino también como optimización de diversas operaciones unitarias clásicas. Por ejemplo, una tendencia actual es la “simplificación” mediante la intensificación de los procesos.*

Para ello se recurre a “fusionar” distintas operaciones unitarias. Un caso típico es la operación de separación y la operación “reacción química”. El clásico esquema de un sistema de reacción seguido de un sistema de separación, es posible “simplificarlo” en ciertos casos fusionándolos; esto es, realizando ambas tareas en el mismo equipo. Es

decir, lograr la separación al mismo tiempo que se logra la conversión de los reactantes en productos. Así surgen por ejemplo la “*destilación reactiva*”, o bien el “*flash reactivo*”. Estos equipos pueden verse como un reactor en donde se logra la separación, o bien un separador (columna o flash), donde al mismo tiempo ocurre una reacción. Esto implica simplificar el diseño, y abaratar mucho los costos.

Como ejemplo de tales avances, puede citarse un caso de interés. Hace aproximadamente dos décadas se logró la transformación (simplificación o intensificación) del proceso de producción de acetato de etilo (básico para la confección de películas para aparatos fotográficos y filmadoras –“antiguos” ahora, pero recientes desde una perspectiva histórica-). En efecto, Kodak comenzó a trabajar con los rollos de película de acetato en 1909 y comenzó a venderlos en 1910 (películas de 22 mm). El proceso luego de diversas mejoras, desde hace un par de décadas involucraba etapas de reacción y diversos separadores, con múltiples ciclos que fueron optimizados energéticamente. Para abaratar costos, se aprovechó la idea de la *destilación reactiva* y al introducir dicha operación se logró simplificar enormemente el proceso, reduciendo así su costo de inversión y de operación evitando reactores, ciertos separadores, ciclos e intercambiadores. Fue un logro notable, impensable con las tecnologías disponibles anteriormente (en cuanto al conocimiento de los fundamentos para el diseño del proceso según las operaciones unitarias disponibles).

Paradójicamente, este ahorro no ha sido muy importante para la empresa mencionada, ya que el avance de la fotografía digital, incorporada hoy hasta en los celulares, fueron minimizando la importancia (poco tiempo después) de la fabricación -aunque sea mucho más barata- de materiales para la confección de rollos para filmación o fotografía (debido a la competencia). En efecto, cambiaba de raíz la tecnología, que cambiaba la forma de tomar la imagen, grabarla y/o transmitirla -siendo la impresión solo una de las posibilidades-. Esto es un buen ejemplo de cómo la innovación y la aceleración del impacto en las tecnologías revoluciona el mundo socio-cultural-económico, ya que en la actualidad lo comentado es historia (a diferencia de solo unas décadas atrás).

Lo descrito solo es un ejemplo entre muchos otros, por lo que nos llama a reflexionar sobre *la estabilidad “casi permanente en el pasado reciente”* de los procesos o tecnologías y la revolución acelerada experimentada desde hasta hace relativamente muy poco tiempo. Todos vemos, cada vez más, el cambio acelerado de las tecnologías para prestar el mismo servicio o producto, mediante formas radicalmente diferentes, reemplazando integralmente a la tecnología anterior.

Dentro de este contexto, se vislumbra el nacimiento de nuevas ramas o especializaciones, tales como ingenierías a nivel molecular, o biomolecular. Todo indica que efectivamente tendrán mucho protagonismo distintos campos del saber y sus tecnologías asociadas en el futuro inmediato o mediano. Existen certezas respecto a la aplicación de nuevos materiales, con diseños involucrando cambios de escala a niveles micro y nano, para el desarrollo de nuevos procesos asociados a diferentes áreas del desarrollo tecnológico.

En cuanto a la operación de los procesos, la computación, la robotización y la inteligencia artificial, están ya revolucionando y lo harán aún más, tanto la tarea de diseño como la operación, la logística, la seguridad, aumentando la productividad. Se

intensificarán la optimización de los sistemas y los métodos de supervisión de los procesos, y por lo tanto la eficiencia y la seguridad. *Se han acuñado los términos economía del conocimiento e industria 4.0, entre otros, para reflejar tales tendencias.*

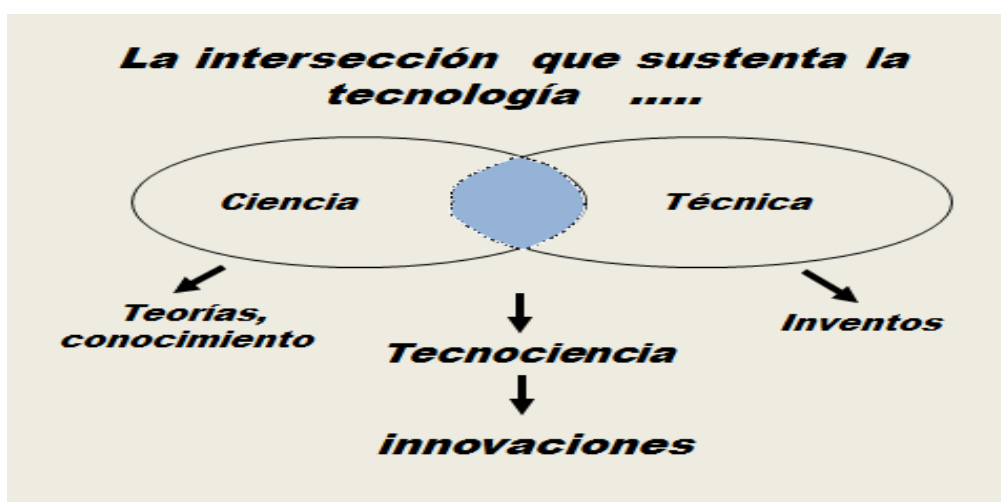
Por último, es conocido actualmente el progreso del deterioro ambiental, el cambio climático, los efectos sobre la vida planetaria. Se comprenden mejor los fenómenos climáticos y los agentes perturbadores. Se necesitan nuevos procesos que consuman distintos tipos de energía no contaminante, como lo hacen los clásicos combustibles. O bien nuevos procesos que capturen los gases de efecto invernadero producido “in situ”. Por otra parte, la complejidad de los nuevos procesos y la escala de producción, o los materiales manipulados, incrementan el riesgo al cual está sometida la población, al igual que los trabajadores. Los accidentes de estos establecimientos en funcionamiento han sido en ciertos casos muy serios, con cientos o miles de afectados, y enormes cantidades de personas evacuadas.

Debido a esto, recientemente se han consolidado nuevas filosofías de diseño, tales como diseño inherentemente seguro, diseño sustentable, diseño sostenible, diseño basado en riesgo, entre otros, según hemos comentado más arriba. En todos los casos, se pretende *en etapas tempranas del proyecto de diseño del proceso*, contemplar todos los factores (seguridad, daño al ambiente, etc.); contrariamente a como se hacía habitualmente -diseño clásico- (y aún hoy en ciertos casos), contemplando tales factores *cuando la etapa de la ingeniería conceptual y de detalle están definidas*. Lo cual implica luego -si los resultados del análisis de riesgos o los impactos ambientales estimados no son tolerables-, y de ser necesarias grandes modificaciones; pagar altos costos y sufrir demoras en los proyectos de diseño.

Formación del ingeniero Químico

En síntesis, hemos concluido que existirán aceleradamente numerosas modificaciones e innovaciones que implicarán diversos procesos innovadores; según evolucione la tecnología. Al mismo tiempo, se necesitan nuevos métodos de diseño, y formación básica suficiente para poder implementarlas.

Dentro de este contexto temporal, geográfico, disciplinar, multidisciplinario, nos centraremos en los procesos químicos, teniendo en cuenta que en el futuro pueden surgir procesos no imaginados hoy....



¿Cómo formar al ingeniero?.

¿Cuál será el conjunto de demandas que el sistema socio-cultural-económico le planteará a la profesión?

¿Competencias, conocimientos?

La formación de los profesionales es una actividad central de las Universidades.

Para ello se define una currícula y un plan de estudios, que tienen como objetivo definir el marco general y los objetivos, y detallar las disciplinas necesarias a impartir la proporción y ordenamiento con que se dictan, conformando el proceso de enseñanza – aprendizaje. Las disciplinas necesarias son diversas, aunque en general puede afirmarse que las que convergen a la formación de un profesional de la ingeniería se pueden clasificar en:

Disciplinas básicas (Matemáticas, Física, Química, Sistemas de Representación / Fundamentos de Informática, entre otras)

Tecnologías básicas (Fenómenos de Transporte, termodinámica, Fisico-química, entre otras).

Tecnologías aplicadas (Proyecto, Simulación de Procesos, Diseño Seguro de procesos, Diseño de reactores, Tecnología Térmica, Operaciones, entre otras)

También es importante distinguir entre conocimiento y competencias, ya que en el primer término englobamos los cuerpos de saberes disciplinares (el saber *el que* son las cosas y los fenómenos), mientras que en el segundo nos referimos a la adquisición de habilidades, capacidades para la resolución de problemas ingenieriles, modalidades de trabajo y de desempeño (saber el *cómo hacer*). Ambas componentes del “saber ingenieril” son básicas para el ejercicio profesional (práctica profesional). Obviamente, están íntimamente ligadas, aunque denotan un tipo de conocimiento o capacidades /habilidades diferentes

En nuestro país la CONEAU es la institución encargada de supervisar y evaluar la calidad de las instituciones universitarias y las carreras que se imparten en las mismas, aunque no es quien determina los estándares deseables o de referencia para cada carrera de ingeniería. Para normalizar y facilitar la unificación curricular, las disciplinas han sido agrupadas en: Ciencias Básicas, Tecnologías Básicas, Tecnologías Aplicadas y Complementarias. En los estándares para la acreditación en nuestro país se ha asignado una carga horaria mínima a cada bloque, y por lo tanto a la totalidad. En definitiva, queda claro el criterio que pretende dar respuesta a la problemática de amalgamar la tensión entre el conocimiento disciplinar vs. el perfil profesional al delinear o cuantificar relaciones mínimas y porcentajes entre las distintas componentes disciplinares y cargas prácticas (tendientes a lograr competencias).

Dichas cargas y las proporciones que de ellas se derivan son una referencia, pautas mínimas, que pueden ser modificadas incrementando la carga total y la distribución relativa respecto del total de cada área disciplinar. Son las Universidades quienes proponen sus diseños curriculares y planes de estudio pudiendo ampliar con un criterio propio los mínimos aludidos. Considerando la cultura, la estructura y dimensión social de los actos ingenieriles (hacedores, gestores, operadores de tecnología en un entramado complejo socio-tecnocultural-económico) debemos admitir que los contenidos a impartir son muchos. Es evidente la cantidad de disciplinas o temas relevantes que deben

contemplarse en el diseño del plan de estudios de cualquier carrera de ingeniería; tanto en lo disciplinar como en lo complementario. Un dilema es definir la carga horaria total y su distribución para articular, entrelazar cada uno de los diversos conocimientos disciplinares en el proceso de la formación del ingeniero. Debe tenerse en cuenta que fijado institucionalmente un diseño curricular y un plan de estudios, se ha explicitado el ideal formativo para con el futuro profesional y los objetivos para el proceso de enseñanza – aprendizaje.

Es de notar que justamente, un nuevo ciclo de este proceso se ha comenzado hace unos años en la UTN, y ha culminado en la modificación de los planes de estudio, en particular en ingeniería química. Específicamente, entre otras, el contenido de esta asignatura (ex Integración IV). No obstante, dado que formaba parte, en su oportunidad, del tronco integrador -en el sentido de pertenecer a la columna vertebral en el esquema de formación del futuro ingeniero químico-; esta nueva versión de la asignatura se potencia en tal función, ya que incorpora los aspectos relacionados con el diseño seguro y la operabilidad segura de los procesos. Cabe notarse, en función de las tensiones anteriormente mencionadas, que dado las horas asignadas y temáticas incorporadas, se debe realizar un esfuerzo importante tanto en los aspectos didácticos como pedagógicos para lograr los objetivos deseados al considerar los contenidos mínimos de esta nueva asignatura.

Según hemos visto, ingeniería y tecnología están íntimamente vinculadas. En efecto, desde un punto de vista epistemológico, si se considera a la tecnología un saber, como tal no es más que otra disciplina que sustenta a la profesión ingenieril. Si prevalece la visión derivada de la racionalidad tecnológica, la actividad profesional consiste prioritariamente en la resolución de problemas aplicando el método científico-tecnológico. Bajo un enfoque cognitivo se concibe principalmente a la tecnología como un conocimiento, y subsidiariamente como una acción. También existen tensiones cuando se prioriza la visión de “la técnica” o bien de “la tecnología” como acción y subsidiariamente como conocimiento.

Debido a esta ambigüedad que hace a la tecnología por un lado un saber, por otro un hacer, podemos afirmar que se constituye en un componente clave de la profesión ingenieril en función de las disciplinas científico-tecnológicas que la sustentan. La simbiosis creciente entre ciencia y tecnología (y en forma semejante, entre conocimiento básico o aplicado) más que una contraposición, resulta en la actualidad el sustrato que motoriza el avance de la profesión ingenieril relativizando la ambigüedad comentada.

En nuestro caso, es interesante en este marco, comentar respecto a nuestra asignatura “*Diseño, Simulación, Optimización y Seguridad de Procesos*” -ex Integración IV- que por su contenido, naturalmente relaciona integralmente conocimientos básicos con aplicados, mediante la confección o la utilización de herramientas de simulación y optimización de procesos utilizando sistemas computacionales; el cálculo avanzado, las estimaciones de propiedades físico-químicas, la síntesis de procesos, el diseño abarcando los nuevos paradigmas tales como seguridad de procesos y el impacto ambiental, al igual que la intensificación de los procesos mediante la integración de operaciones unitarias, tal como se ha detallado en la sección anterior, producto del avance acelerado de la ciencia y la tecnología.

Dentro de este contexto, respecto de la relación *saberes disciplinares / profesión / competencias*, nuestra asignatura profundiza las relaciones principales con muchas otras del plan de estudios. Según lo mencionado más arriba existe una vinculación directa con termodinámica y fisico-química, dado que cualquier modelo de operaciones unitarias y la resolución de cualquier balance de materia, energía y cantidad de movimiento (operación aislada o un proceso completo) implica la estimación de propiedades fisicoquímicas. Cualquier simulador de procesos contiene un banco de datos y modelos para el cálculo de tales propiedades.

Por otra parte, la asignatura fundamental para la introducción al modelado de procesos es Fenómenos de Transporte; clave en nuestro caso, para comprender la conformación de los modelos y luego la estrategia de resolución, codificadas en el lenguaje apropiado seleccionado por cada diseñador al elaborar su simulador de procesos. Para comprender esto, y aún para elaborar herramientas de cálculo individual, o bien para incorporar nuestros propios modelos al simulador comercial que dispongamos, son importantes los conocimientos que se disponen provenientes tanto de Fundamentos de Informática como de Matemáticas (cálculo numérico vs, cálculo simbólico o analítico). Por otro lado, dado que los modelos se refieren a operaciones unitarias, y un simulador genérico dispone de un banco de modelos de equipos con la mayor cantidad de operaciones unitarias posibles para lograr generalidad; todas las asignaturas que se refieran al diseño de operaciones unitarias (reactores, equipos para la generación de energía y transferencia de calor, sistemas de bombeo, compresores, expansores, equipos para separación de mezclas tales como columnas de destilación, separadores flash y contactores líquido-líquido, entre muchos otros), están íntimamente relacionadas.

Por otra parte, no existe un simulador “general”. En efecto, como es conocido, existen una gran cantidad de procesos, tales como los petroquímicos, de la industria de los biocombustibles, alimentos, de tratamiento de efluentes, siderúrgicos, de la industria de papel, minería, entre otros. Por su modo de operación pueden ser batch, continuos o semicontinuos. En cualquier caso, se podrá o no simularlos según el simulador disponible, ya que los equipos y modelos fisico-químicos disponibles, o el tipo de proceso para el cual están diseñados (dinámico, estacionario, batch) son limitaciones importantes. En ciertos casos puede solucionarse el problema si el usuario tiene cierta formación, o sea, un “usuario avanzado”. Esto es, con capacidad de introducir sus propios modelos en el simulador existente. En este caso, debe tenerse un cierto conocimiento de programación.

Dado que los simuladores abarcan tanto el comportamiento estacionario como el dinámico, para este último caso es importante analizar el comportamiento no solo a lazo abierto, sino a lazo cerrado; esto es, con presencia de controladores en el proceso. Esto implica entonces, la vinculación íntima con Control de Procesos. Además, dado que el simulador es una herramienta importante para la simulación y el diseño de procesos químicos, su relación con la asignatura Proyectos es obvia.

Por último, cuando se analizan las consecuencias de las fallas de procesos debido a pérdidas de contenido en tanques, equipos o cañerías, por ejemplo explosiones, incendios, difusión de gases tóxicos; se debe disponer modelos de tales fenómenos a los efectos de estimar la vulnerabilidad del entorno. Esto es, se debe determinar el campo de sobrepresiones, de radiaciones o de concentraciones en la zona de afectación, a los efectos

de evaluar las consecuencias sobre cada elemento del entorno afectado. Para estas tareas, al igual que para la simulación de procesos en el contexto del diseño, para modelar tales fenómenos también debe estimarse las propiedades físico-químicas correspondientes, y considerar los balances de materia y energía, para luego resolver los modelos numéricamente. En otras palabras, son programas que simulan los efectos de los eventos accidentales, es decir el funcionamiento anormal del proceso, más allá de los objetivos del diseño que hemos comentado hasta aquí.

Ingeniería Química e Ingeniería de Procesos

Existen numerosas tareas y áreas disciplinares en las cuales puede actuar un ingeniero químico. De acuerdo con los objetivos básicos de nuestra asignatura, resulta relevante definir y contextualizar el campo de la Ingeniería de Procesos. Se abarcan principalmente dos grandes áreas:

- *Diseño de Procesos*
- *Gerenciamiento de Procesos*

Tanto para la operación de los procesos como para su diseño, la computación como herramienta ha cobrado un rol progresivo y determinante. Se han acuñado los términos CAD/CAM (computer aided design y computer aided manufacturing), indicando las ramas de diseño asistido por computadora y la manufactura asistida por computadora. En el caso de la manufactura asistida por computadora, los cambios han sido notorios en todas las ramas de la ingeniería. Por ejemplo, en la ingeniería mecánica podemos citar como un ícono al torno numérico, que ha revolucionado desde hace décadas la mecanización y diseño/maquinado de piezas en forma radical. En la actualidad, como es conocido, existen sistemas robotizados para la producción de diversos sistemas mecanizados.

Por otra parte, son también conocidos los SGP (Sistemas de Gestión de Producción), que permiten organizar y sistematizar los procesos industriales para la gestión y mejora (gestión de la calidad, mantenimiento, planos y archivos, inventarios y gestión de stock). Están sustentados por bases de datos integradas a diversos sistemas de cómputo, facilitando la organización, almacenamiento, sistematización y procesamiento de la información pertinente; para la operación y/o diseño de procesos, a los efectos de organizar los datos y obtener información para múltiples necesidades.

En el campo de los procesos en general y los químicos en particular, el surgimiento de los sistemas de adquisición de datos en tiempo real (SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition) han significado un avance de mucha importancia para la supervisión y operación de los mismos. En efecto, estos sistemas consisten en un dispositivo computacional que mediante bases de datos y sistemas de medición y actuación sobre los dispositivos de control del proceso, pueden almacenar según intervalos de tiempo fijados, el estado de todas las variables medidas, y disponer de dicho historial para su procesamiento. Paralelamente, a partir de dichas mediciones y mediante los lazos de control establecidos y definidas sus lógicas de control, es posible supervisar y controlar inteligentemente el proceso. Además, ante eventos de fallas, pueden programarse la activación de sistemas de alarmas, y si es necesario, de paradas de planta (seguridad del proceso).

A partir de esta breve descripción, resulta evidente la penetración de los sistemas informáticos en el ejercicio de la tarea del Ingeniero Químico, en particular la del Ingeniero de Procesos. En Efecto, tanto en cuanto al Gerenciamiento de Procesos, como en lo que respecta al diseño de los mismos.

En este apartado nos centraremos más en la actividad de diseño. Una cuestión importante es la respuesta a las siguientes preguntas:

¿Qué es un proceso químico desde una perspectiva sistémica?,
¿Y la Ingeniería de Procesos?.

Realizaremos el análisis en el marco de la visión sistémica del diseño y el análisis de los Procesos (Process System Engineering). Existen diversas definiciones orientadas a enfatizar alguna propiedad u objetivo de los procesos.

Proceso:

-Sistema formado por dispositivos interconectados en forma organizada, que permiten cambios fisicoquímicos, biológicos, o de otra índole, a nivel macro, micro o nano, para lograr productos de interés.

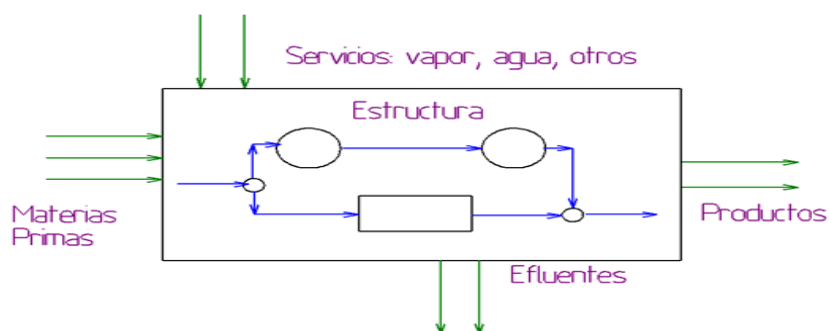
-Arreglo de aparatos / equipos, dispositivos, interconectados en forma estructurada con el objetivo de producir cambios físicoquímicos, biológicos, entre otros, para lograr productos de interés, a partir de materias primas adecuadas.

-Sistema de procesamiento que por medio de transformaciones fisicoquímicas, biológicas u otras, convierte los materiales de partida en los productos deseados y/o especificados, operando en forma estacionaria, pseudo-estacionaria o batch.

-Conjunto de etapas, equipos, dispositivos, que permiten transformar materias primas en productos y subproductos, con el uso de servicios auxiliares y la adición o el secuestro de energía, mediante cambios físicos, biológicos, químicos, u otro tipo, con el objetivo de agregar valor a un conjunto de materiales de partida (materias primas).

Variables típicas de los procesos, necesarias de caracterizar

Esquema tipo (caja negra) o representación por bloque de un proceso



- Estructurales: representación de la topología del proceso (diagrama de bloques o diagrama de flujos, etc.)

-Variables intensivas y extensivas

Intensivas (T, P.....)

Extensivas (m, V.....)

-Funcionales u Operacionales: Relacionadas con los distintos modos de operación posibles del proceso. Arranque y Parada, controladores, sistema de supervisión, elementos de seguridad...

Tipos de procesos y sus características básicas de operación

Procesos continuos vs. Discontinuos o batch

Estado estacionario vs. Estado dinámico o transiente

Procesos continuos, estacionarios, características básicas

Los materiales se procesan por medio de unidades especializadas. Cada una (y por lo tanto el conjunto o proceso) opera en estado estacionario y realiza una función determinada. Tantos los ingresos de materiales como la salida de productos son flujos continuos y estacionarios. Generalmente de producción masiva (petroquímica, alcohol, materias primas a granel). Tienen un precio bajo por unidad de producto (en general toneladas)

- Gran escala de Producción
- Cada equipo realiza una operación o función específica
- Calidad del producto constante
- Velocidad de producción constante
- Automatización y supervisión integral (sala de control)
- No son intensivos en mano de obra

Procesos Discontinuos o batch. Características básicas

El procesamiento se realiza en una secuencia de tareas o transformaciones que deben ser realizadas en un orden definido. La culminación de esta secuencia de pasos produce una cantidad especificada de producto final. Esta cantidad es lo que se denomina batchada. En general cada unidad opera en estado no-estacionario.

Dado que los procesos batch son esencialmente discontinuos y los materiales se procesan por lotes, si la cantidad especificada o requerida de producto es mayor que esta cantidad, la secuencia debe ser repetida (ciclos de producción o secuencia de batchadas). El tiempo total de producción se conoce como horizonte de tiempo de producción.

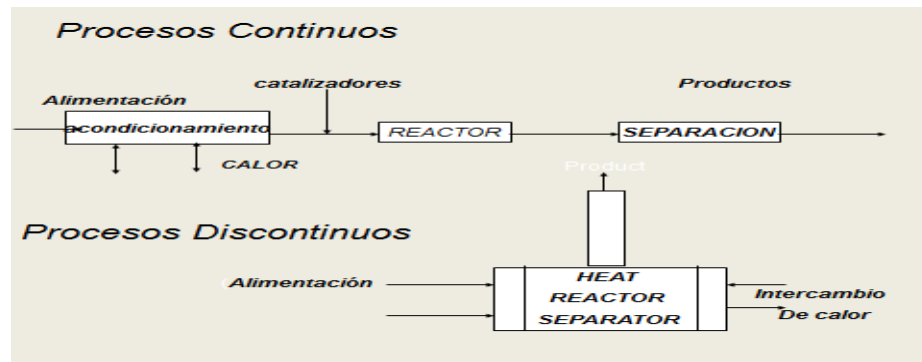
Escala de producción: desde kilogramos a pocas toneladas anuales

La mayoría de los productos de la química de las especialidades o química fina, son producidos en modo batch, dado la baja escala de producción. Se caracterizan también por un valor elevado a muy elevado por tonelada producida.

Otras características de los procesos batch son las siguientes:

- Tiempos de procesamientos o residencia relativamente mayores
- Productos de calidad relativamente más variable
- Mayor mano de obra (en relación a los estacionarios) por unidad de producto
- Productos de alto valor y más ajustados a la necesidad del cliente (a demanda)
- Flujos pequeños. Pequeña escala de producción
- Funcionamiento intermitente. Ciclos de operación
- Velocidad de producción variable (producción planificada y flexible)

- Plantas flexibles, multi-producto y multi-propósito
- Procedimientos de síntesis y diseño más complejos- Es muy importante la programación y planificación de la producción.
- Condiciones de control muy estrictas. Mayor dificultad para el control y la supervisión del proceso centralizada.



En la figura anterior se muestra sintéticamente una diferencia importante entre procesos continuos y batch. Mientras que en los primeros cada equipo está dedicado a una sola operación, en los procesos batch es posible, mediante secuencia de operaciones, utilizar el mismo tanque o recipiente para calentar, agitar y acondicionar los reactivos, luego realizar la etapa de reacción, luego la separación.... etc. Es decir, cada unidad de procesamiento (equipo) puede ser multipropósito.

En general, cada producto involucra una secuencia de operaciones (receta de producción), por lo que se pueden (dada una planta fija) procesar varios productos definiendo las recetas de producción y un arreglo estructural (en la planta dada) para cada uno de ellos. Es posible utilizar equipos dedicados (a un solo producto) o bien durante el ciclo de producción de más de un producto (en simultáneo) utilizar alguno de ellos para diversos productos en distintas etapas (evitando la superposición), siguiendo para cada uno una receta y su correspondiente arreglo estructural. Obviamente aquí la logística -secuencia de producción de cada uno de los productos- debe evitar usos simultáneos de equipos y verificar los recursos y servicios disponibles.

Esto implica una operación o gerenciamiento (y por lo tanto supervisión y control) bastante más complicada que en los procesos continuos. Luego, si se produce un solo producto (monoproducto), o bien dos o más (multiproducto – si bien con arreglos diferentes en la conexión estructural de los equipos, pero no procesados simultáneamente, sino por campañas diferentes-). En el caso de dos o más productos bajo una modalidad multipropósito–multiproducto, además de utilizarse distintos arreglos estructurales para la producción de cada uno, la “receta” o secuencia de pasos en la producción de cada producto se implementa en forma simultánea para todos; o bien para un grupo dado de ellos en función de la demanda.

Es obvio que la complejidad, tanto para la operación como para el diseño, es creciente a partir del proceso batch monoproducto, siguiendo por el multiproducto y finalizando con el multipropósito.

Existe una amplia variedad de procesos que utilizan el modo de operación batch, por ejemplo en la industria farmoquímica. Estas emplean un conjunto fijo de operaciones batch que se realizan en equipos estandarizados en plantas multipropósito. En general, las tres fases principales en la manufactura de los productos farmacéuticos son:

1. Síntesis
2. Purificación
3. Formulación/dosificación

Cada producto es generalmente fabricado por campañas, durante la cual una o más líneas de producción (de la planta general) son usadas por días, semanas o meses para fabricar la cantidad de la demanda proyectada. Luego del ciclo de limpieza posterior a cada ciclo de producción, los equipos estándares pueden ser usados para fabricar otro producto usando otras materias primas de acuerdo a cada receta batch.

La etapa de formulación y dosificación de los medicamentos, en general se realiza en plantas/empresas separadas, siendo éstas por lo general mutipropósito / multiproducto.

Métodos, estructuras y Características de los Procesos Batch

En función de las características de las plantas batch, (monoproducto , multiproducto, multipropósito), considerando que cada unidad batch se carga, descarga y procesa por lotes (reactor, columna batch, mezcladores, cristalizadores, otros), y que pueden existir unidades semicontinuas (operan en forma continua entre las operaciones batch, intermitentemente); hemos visto que no basta con el flowsheet del proceso y el valor establecido para las variables operacionales o funcionales para describir o especificar el comportamiento del mismo, sino que se necesita además una “receta de producción” y/o scheduling de programación de la producción (sucesión de eventos discretos secuencial). Esto obviamente impacta en el diseño y modelado de tales procesos.

Resumiendo:

Políticas de operación

Monoproducto:

Se produce un solo producto con una secuencia definida, cíclicamente, siempre en igual forma, hasta finalizar la campaña.

Multiproducto:

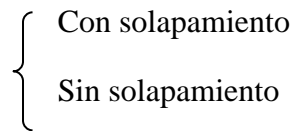
A diferencia de la anterior, aquí se produce una serie de productos. Cada uno de ellos sigue una secuencia definida, cíclicamente, no superponiéndose las campañas

Multipropósito:

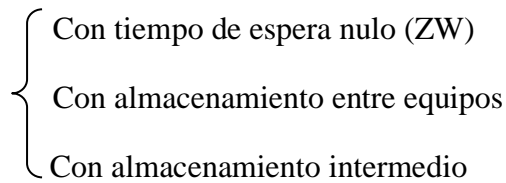
Se fabrican/procesan varios productos. La ruta a seguir para cada campaña es función de la disponibilidad de equipos y/o almacenamiento, por lo que pueden seguir distintos caminos de producción en cada campaña. Se producen simultáneamente dos o

más productos, según la demanda y la disponibilidad de recursos existente en cada momento.

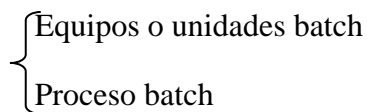
Modos de operación más comunes



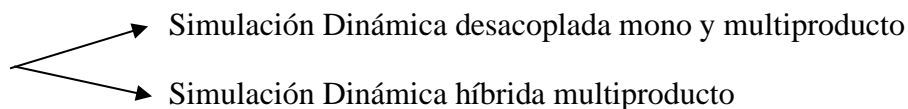
Transferencia entre etapas



Modelado de procesos batch



Un proceso se describe principalmente por la receta de producción; y por el detalle de cada unidad de producción.



Simulación Dinámica Desacoplada.

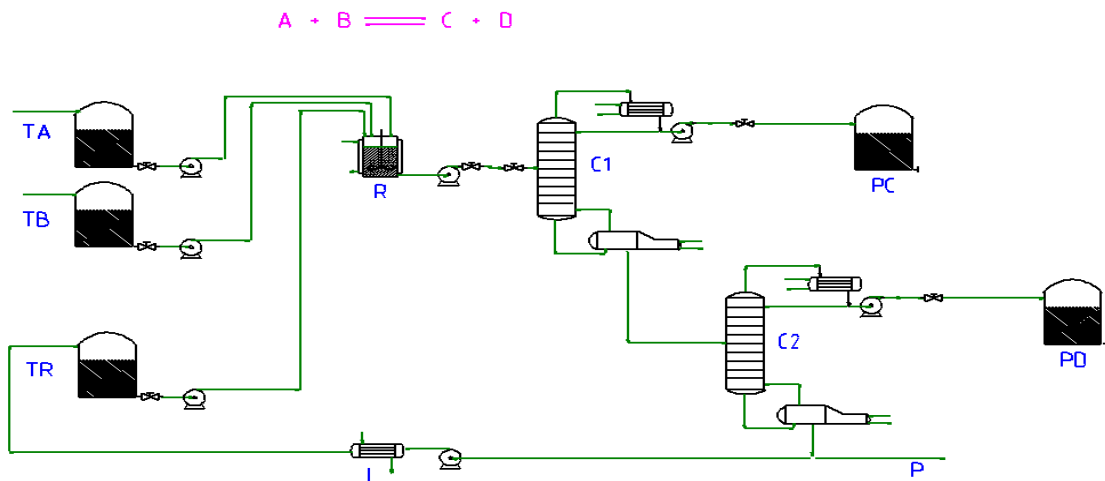
Las unidades batch se simulan en forma individual, por lo que si existen los módulos se puede utilizar un simulador general, en modo dinámico. Se obtienen así parámetros para el modelado del proceso/ programación de la producción. Si en cambio se pretende simular un proceso multipropósito / multiproducto, el problema se complica bastante y son necesarias herramientas computacionales específicas.

Ejemplo de un proceso batch y uno continuo. Aspectos Relevantes

A modo de ejemplo comparativo se puede vislumbrar el mismo proceso en modo estacionario (las figuras siguientes) y operando en modo batch.

Supongamos de manera general un proceso para la producción de los productos PC y PD, a partir de la transformación de las materias primas de partida (A y B). La reacción es la indicada en la figura. El proceso estacionario propuesto es deducible de modo general con observar el diagrama de flujos, en el cual se indican los recipientes de

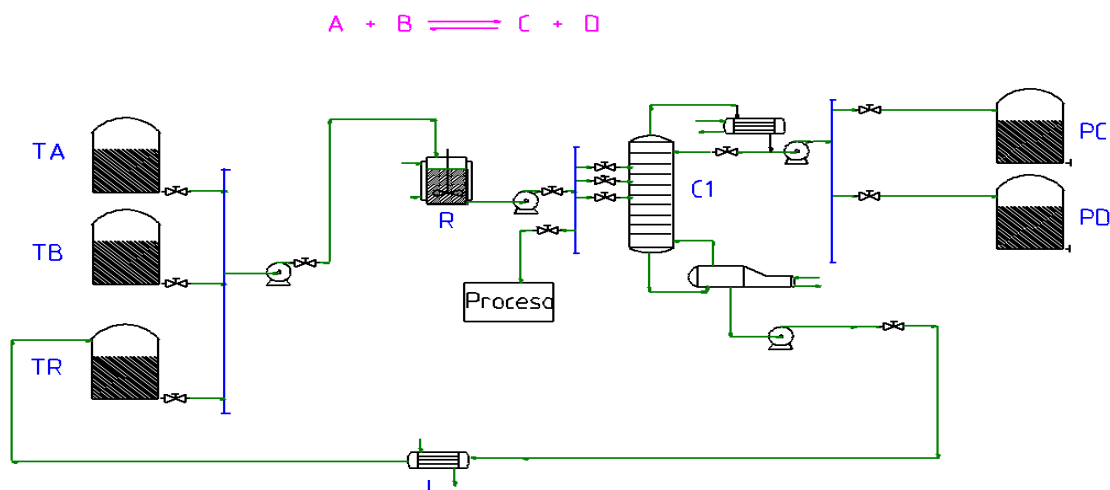
almacenamiento de los reactantes A y B, las líneas de alimentación al reactor y los elementos de bombeo para A, B, y además para R, el reciclo; que involucra a los reactivos sin reaccionar, dado que la reacción es reversible.



La corriente de salida del Reactor R se alimenta al tren de separación conformado por dos columnas de destilación, C1 y C2. Por el tope de la primera se obtiene el producto C, y la corriente del fondo se alimenta a la columna C2. En ella, por tope se obtiene el producto D, y por fondo la mezcla no reaccionante se recicla al tanque TR y al reactor por bombeo, según muestra la figura. El reciclo es acondicionado térmicamente, previo a su ingreso al tanque TR. También se indica una corriente de purga, para evitar la acumulación de inertes en el proceso (P).

Como puede verse en el diagrama correspondiente al proceso batch, si bien la reacción entre reactivos para obtener el producto es la misma, el modo de producción no lo es.

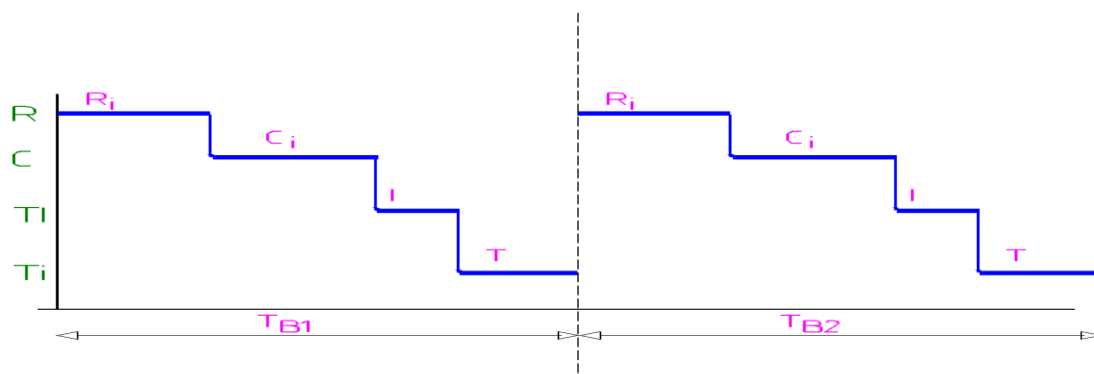
Esquema del proceso Batch



En el esquema no aparecen dos columnas, ya que al ser discontinuo el proceso, solo basta con una, ya que, en cada tiempo asignado, en la misma columna se tendrán que realizar las dos etapas de separación, en función de la receta de producción. Es por ello que solo el diagrama del “proceso”, no describe por sí solo las operaciones y transformaciones necesarias para lograr los productos a partir de las materias primas. Aquí debe remarcarse que el diseño de una planta batch nunca se diseña o se proyecta para un solo producto, ni un conjunto específico, ya que se espera que a lo largo del tiempo cambiarán los requerimientos. Por ello se trata de un diseño flexible, robusto, apto para la producción de diversos conjuntos de productos. Es por ello también, que dada una planta existente, el problema más común es plantear la receta de producción en base a la disponibilidad (equipos, tanques, servicios auxiliares) disponibles y el cronograma de producción establecido; que es generalmente función de las demandas del mercado y cambia con frecuencia.

Por lo general el proceso o planta industrial, junto con todas las conexiones y sistemas de bombeo son fijas, aunque pueden mediante válvulas o conexiones flexibles, habilitarse y/o anularse múltiples uniones entre cada uno de los equipos disponibles. Por ello, lo más importante no es la configuración de los equipos (esta debe cambiar según cada producto a obtener) sino la receta de producción, que en definitiva la condiciona. Esta indica los equipos, el orden, los tiempos y secuencias para la producción.

Diagrama de Gant (secuencia temporal de tareas)



En el esquema se indica, para cada ciclo de producción o tiempo de bachada (T_{B1} , T_{B2} ...), la secuencia de producción. En nuestro caso, y según esta “receta”, en primer lugar se realiza la reacción (con tiempo de reacción R_1), luego el traslado o vertido a la columna de destilación (que aquí se supone instantáneo, al igual que los tiempos de carga de reactivos al reactor, A, B, y R –reciclo-). Otra manera es indicarlos explícitamente o bien incorporarlos en los tiempos de procesamiento de cada etapa /operación. Nótese que se indica con C_1 el tiempo involucrado en la destilación, que comprende en la primera etapa (destilación batch, composición que varía en el tiempo) la producción del componente más volátil (como en el caso continuo o estacionario supongamos que los dos productos de la reacción son más volátiles, por lo que en este caso, el primer producto es el que en el proceso continuo se extrae por tope de la primer columna -C- (el más volátil de todos). Nótese que en el fondo no extraemos ningún producto durante esta operación, y se van acumulando los pesados residuales en función del tiempo. Cuando comienza a agotarse el primer producto, comienza a salir por tope el otro producto -D-

(segundo más volátil). Esto puede verificarse por inferencia según la temperatura en tope, o bien realizando análisis del producto con una frecuencia dada, o de la manera que resulte más conveniente.

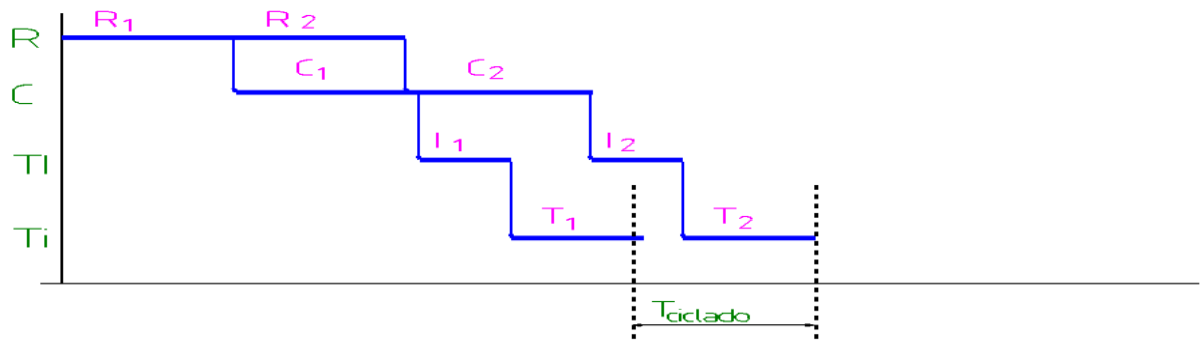
Una vez verificado que la corriente de tope ya no es D puro, sino que comienza a contaminarse con los pesados (A y B no reaccionados), debe interrumpirse nuevamente la operación para habilitar, desde el fondo de la torre, la línea de vaciado del líquido residual. Normalmente, lo que se hace es bombearla al tanque de recirculación TR, para cargar el reactor en el próximo ciclo. Dado que debe intercambiar calor en el intercambiador, aquí se indica la operación (que involucra activar la circulación del otro fluido en el intercambiador) con el tiempo I_1 en la figura.

Por último, una vez que se ha cargado el tanque TR, y acondicionado nuevamente los equipos (limpieza si es necesario, verificaciones, etc., tiempo que se indica en el esquema con T) puede habilitarse el otro ciclo.

Comenzamos con la carga del resto no reaccionado del ciclo anterior, para luego llenar el reactor hasta el volumen correspondiente con una mezcla proporcional según diseño de los reactivos A y B para reiniciar el ciclo, tantas veces como sea necesario. Dado que el volumen producido por ciclo de producción es conocido, y la producción total (o demanda) también, es fácil saber el número de ciclos/bachadas necesarios. Al finalizar la campaña, los productos A y B se encuentran en sus respectivos tanques, mientras que en el tanque de Reciclo TR se encuentra eventualmente la parte del reciclo no utilizado lo largo del horizonte de tiempo. Nótese que debe analizarse si es necesario acondicionar el contenido del tanque de reciclo o dejarlo para la próxima campaña. Nótese además, que la corriente de purga aquí no existe, contrariamente al proceso continuo, ya que aquí la acumulación se acumula en el TR.

Es importante notar que dado que existe el reciclo de la mezcla no reaccionada, a diferencia del proceso continuo, aquí existen variaciones entre cada ciclo de producción. Por ejemplo, en el primer ciclo no existe reciclo, salvo que se disponga una parte acumulada de ciclos anteriores, lo cual no es aconsejable dada la acumulación de inertes. La repetición exacta de las composiciones, temperaturas, caudales en cada ciclo se da a partir de un dado número de ciclos, ya que convergen las cargas y descargas entre cada etapa del proceso batch a lo largo del horizonte de tiempo (y es llamada convergencia a lo largo del horizonte de tiempo de la receta de producción).

Por ello, cuando hablamos de control del proceso, debemos tener en cuenta que la calidad del producto (es decir la composición del mismo en las condiciones especificadas por diseño) debe contemplarse al final del ciclo total de producción, en el cual los tanques A y B contienen la acumulación de todas las bachadas. Generalmente, la composición del acumulado total es la importante, y no la del primero, último, o las bachadas intermedias. ¿Cómo reducir el tiempo de ciclado?. Mediante el solapamiento entre etapas o tareas



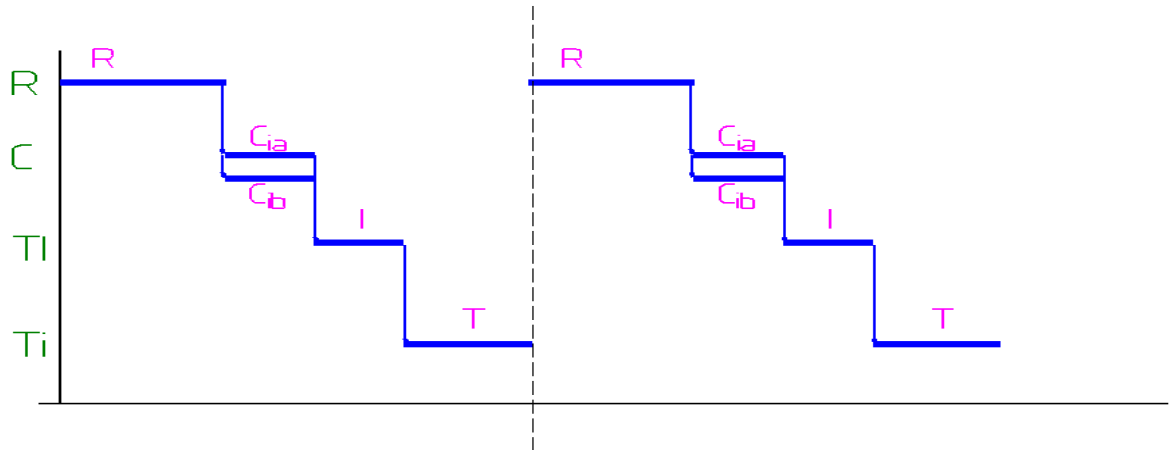
Como contraste entre ambos modos de operación, debemos recordar que en los procesos operados “en modo estacionario”, no es posible lograr tal estado (dado que siempre las variables fluctúan según distintas perturbaciones exteriores) y el sistema de control solo puede mitigar dicha variabilidad respecto del valor deseado o setpoint de control. Además, los procesos deben “llegar al estado estacionario”. En efecto, en general se ponen en marcha o se paran frecuentemente. Por ejemplo, se procede a la parada de planta programada en la parada anual para mantenimiento y acondicionamiento general de la planta. Cuando existen situaciones inesperadas, como fallas accidentales u otras causas, se debe parar la planta, para preservar la seguridad o por necesidad operativa. Obviamente, luego de cada parada o luego de finalizada la construcción del complejo fabril, es necesario la puesta en marcha de la planta. Esta operación es obviamente un símil de un proceso batch. Solo puede describirse por el flowsheet y dada una receta, o procedimiento operativo de puesta en marcha.

Manteniendo el mismo significado que en la figura anterior, en el modo de operación batch analizado, se nota que dado que el reactor luego de finalizar la etapa de reacción en cada etapa batch no se utiliza hasta la próxima, puede entonces -incluyendo los tiempos de carga de los reactivos en los tiempos de reacción indicados en la figura-, cargarse nuevamente en forma inmediata. Como se observa, dado que operan independientemente cada uno de los equipos durante la secuencia de batchadas; mientras -según el programa de producción- no se utilicen simultáneamente los mismos equipos -tanque, línea de conexión o servicio, etc.-, el solapamiento -definiendo nuevos programas de producción- es factible.

El efecto es complicar la secuencia de operación, pero al mismo tiempo disminuir sustancialmente el tiempo de ciclado (tiempo entre batchadas); y por lo tanto, el tiempo de producción total.

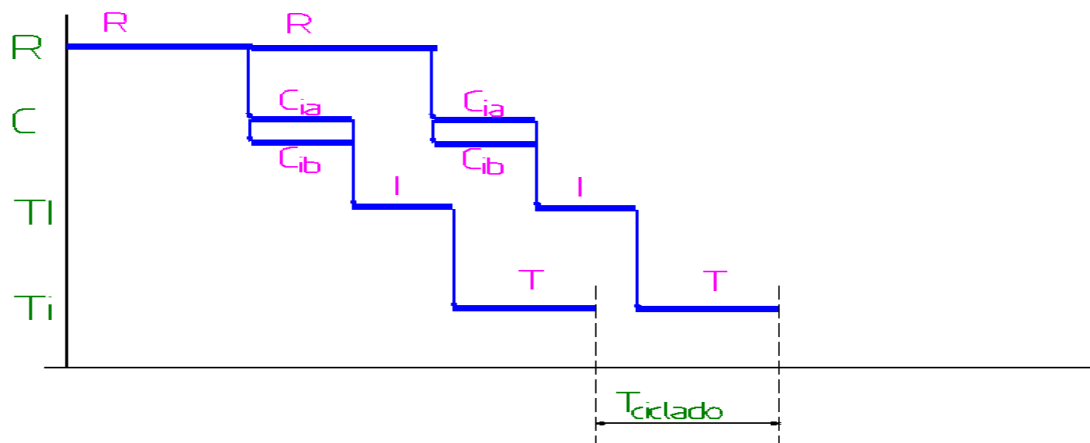
¿Cómo reducir más?. Mediante la utilización de unidades en paralelo:

Si asumimos que la separación es la más consumidora de tiempo, podemos recurrir al expediente de dividir en dos etapas en paralelo la operación de destilación. Obviamente ello implica que en la planta o proceso batch debe de haber disponible una nueva columna, para que ambas alimentadas simultáneamente, procesen en dicha etapa en paralelo el producido por la etapa anterior. En la figura superior se nota claramente que se reduce el tiempo de batchada o ciclado, comparado con la política que no recurre a solapamiento entre etapas.



Con solapamiento y etapas en paralelo

En la figura que sigue se muestra el modo de operación que recurre simultáneamente al solapamiento y operaciones en paralelo en algunas de las etapas del batch (como en la anterior, en la etapa de separación, utilizando dos en paralelo)



Resulta claro que la planta arriba analizada es monoproducto, en el sentido que solo produce C y D como consecuencia de la única receta de producción establecida. Sin embargo, al optimizarla en función del horizonte de tiempo para la producción, aprovechando los recursos existentes, también se complica la operación del proceso y se ocupan más equipos/recursos en simultáneo. Mientras se produzca en serie cada campaña (receta de producción), una planta multiproducto no agregaría más complejidad operacional, salvo la multiciplidad de recetas a conocer por los operadores, complejizando la lógica de control y procedimientos operativos, etc. Finalmente, no podemos decir lo mismo en un modo de producción multipropósito, ya que al necesitarse superponer el uso simultáneo de los recursos (recetas simultáneas), y complicar los modos de producción para cada caso en particular –optimizando su horizonte de tiempo individual-, se comprende la magnitud del problema de optimización del programa de producción de plantas batch (tiempo del horizonte total de producción de la planta), y de cada uno de los productos / recetas en particular, que además cambia según la demanda

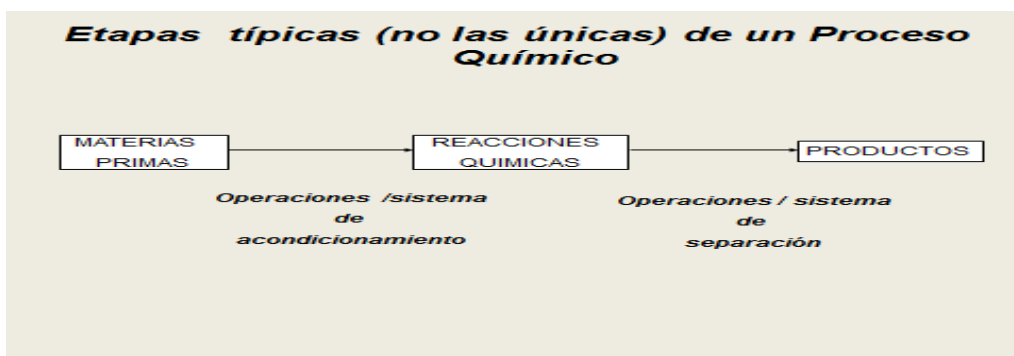
puntual de cada producto, con frecuencia variable... (producción adaptada a la demanda del cliente, o just in time)

Procesos en Estado Estacionario

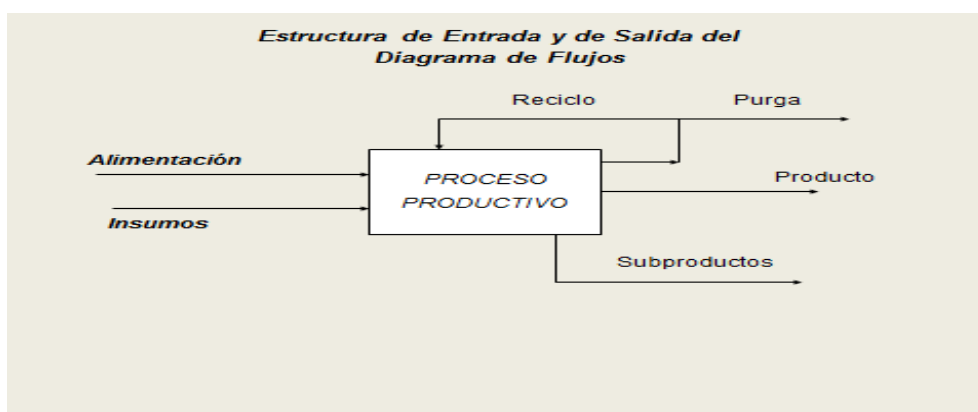
Los procesos más utilizados, dado la escala de producción general, son los estacionarios, ya que de esta forma se reducen costos gracias al factor de escala. Por lo tanto, se recurre a procesos batch cuando no es posible la producción continua. Aquí nos centraremos en las características típicas de un Proceso Químico continuo y estacionario

En general, un proceso típico al menos debe contemplar el acondicionamiento de las materias primas, las etapas de transformación (por ejemplo reacción química) y acondicionamiento de los productos (purificación, separación, etc).

Proceso Industrial Estructura de Entrada y de Salida

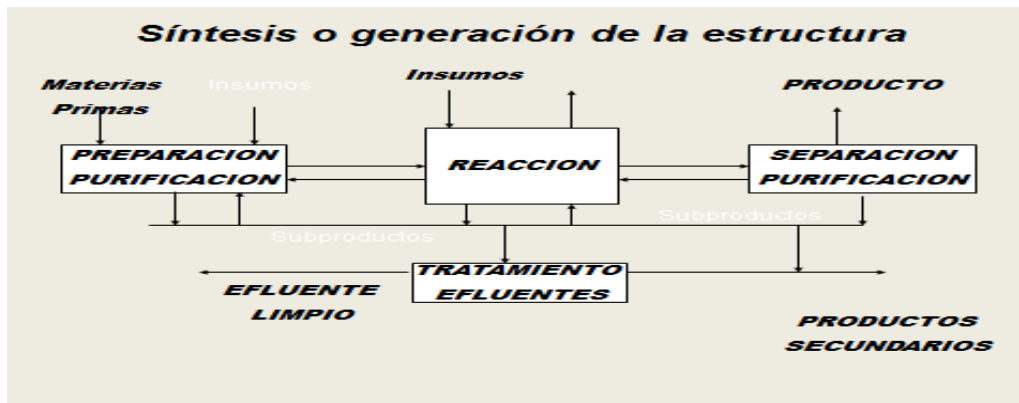


Debe tenerse en cuenta que además de las materias primas (alimentación convencional al proceso), son necesarios un conjunto de insumos y servicios. Se producen además del producto principal otros componentes que pueden ser útiles para la venta (subproductos) o desechos (que deben ser tratados y acondicionados según la normativa, previo al vertido al ambiente)



Pueden también generarse (o provenir con las materias primas o insumos) inertes o impurezas que se acumulan durante la operación del proceso, por lo cual deben tomarse las medidas necesarias para cumplir con las especificaciones de producto, la normativa

relativas a los posibles desechos, las restricciones tecnológicas y las normativas generales existentes. Normalmente deben contemplarse alternativas tales como corrientes de purga y/o reciclós.



Los reciclós son necesarios entre otros motivos para reciclar los reactantes no convertidos, o bien para asegurar la purificación de los productos según las especificaciones requeridas. Pueden existir uno o varios reciclós, según la complejidad de la estructura propuesta y la interacción entre los bloques de proceso descritos. Por ejemplo cuando se necesita recuperar calor entre una corriente que debe enfriarse con otra que debe calentarse, ahorrando así vapor de calefacción y agua de enfriamiento simultáneamente.

Es evidente que la complejidad estructural que se manifiesta a medida que se avanza bloque a bloque sistémicamente en la actividad de diseño, se comienza a complicar la estructura del proceso, lo cual implica que se incrementa la dificultad en la futura actividad de simulación (resolución de los balances de materia y energía), ya que por lo general no se podrá resolver analíticamente, debido, por ejemplo, a la no linealidad que introducen los cambios estructurales introducidos por los reciclós.

Ingeniería de Procesos. Introducción a la Problemática del Diseño

¿Cuál es el mejor proceso (óptimo)?. Obtener una respuesta es el principal objetivo de *la tarea de Diseño de Procesos*, que a su vez es la típica en *la ingeniería de procesos*. Se plantea un problema complejo ya que debe optimizarse tanto la estructura como las condiciones de operación (T,P, caudales, etc), según se verá más adelante a lo largo del desarrollo de la asignatura.

Dentro de la ingeniería química y en la actividad industrial existen diversas actividades o especialidades, tales como *ingeniería de procesos, operaciones y logística, calidad, seguridad y medio ambiente, mantenimiento, instrumentación control y supervisión, laboratorios, servicios*, entre otras.

En particular, todas se enfocan en el proceso, por lo que están íntimamente relacionadas y deben coordinarse. En organizaciones empresariales de cierto tamaño, existen grupos de cada especialidad compuestos por diversos profesionales que trabajan

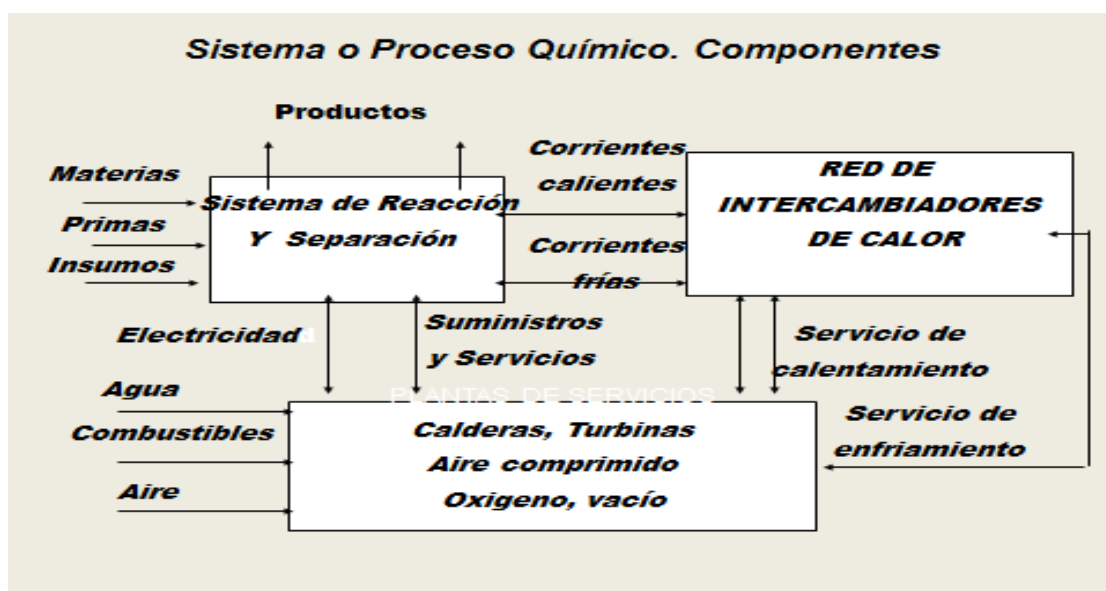
multidisciplinariamente. En general actúan bajo la supervisión de las distintas gerencias, y la gerencia general.

Los procesos, como hemos mencionado, se caracterizan por ser una combinación de equipos (operaciones unitarias) ordenados según una estructura o topología, que involucra las interconexiones entre las unidades de procesamiento y las corrientes que las vinculan, en arreglos de diverso tipo, por ejemplo en serie, serie-paralelo, con o sin reciclos, con repetición o no de ciertas unidades, según cada caso particular.

En este contexto, diseñar significa:

- 1) *Proponer las operaciones unitarias necesarias*
- 2) *Definir una estructura o arreglo para el proceso y las condiciones de operación de cada unidad y del proceso en general*

A medida que se seleccione un mayor número de operaciones unitarias (equipos, unidades de procesamiento, dispositivos), mayor será el espacio de alternativas estructurales posibles de definir y que deberían ser exploradas y evaluadas para compararlas y seleccionar la mejor u óptima (actividad llamada evaluación de alternativas). Nótese en la siguiente Figura, que a medida que incorporamos bloques, en este caso la red de intercambiadores de calor a los efectos de recuperar la máxima cantidad de energía entre corrientes calientes (que deben enfriarse) para calentar a las corrientes frías (que por razones de diseño del proceso deben calentarse). De esta manera, se logra minimizar simultáneamente los requerimientos de calor y los de enfriamiento.



Una vez definidas el conjunto de estructuras prometedoras -los equipos y las conexiones entre cada uno de ellos (flowsheet)-, se deberá evaluarlos para seleccionar las más convenientes según los criterios que adopte el diseñador. La herramienta habitual utilizada para ello, según mencionamos, son los simuladores de procesos, que no son otra

cosa que un software muy potente que permite, dados los datos necesarios, resolver los balances de materia, energía correspondientes.

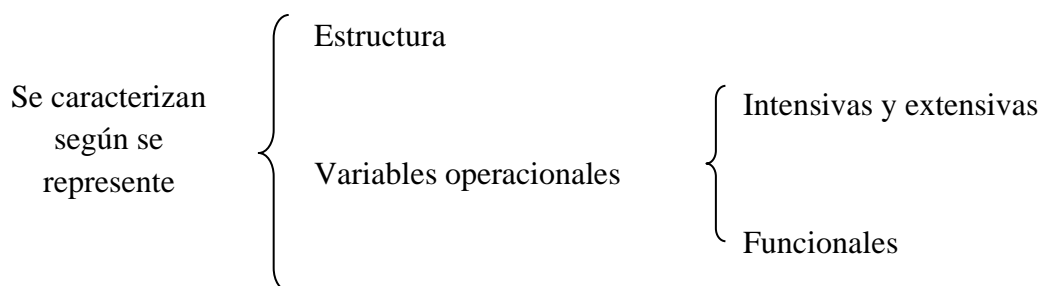
En resumen, en la etapa de diseño de procesos, el ingeniero de procesos se involucra en una tarea iterativa que se desarrolla por etapas, comenzando con la síntesis de estructuras posibles para el proceso, siguiendo con la evaluación – optimización (de la performance de cada estructura propuesta) minimizando costos o maximizando beneficios, para seleccionar la mejor estructura a partir del conjunto de análisis. Debe comentarse que en las últimas décadas se han desarrollado herramientas computacionales para realizar simultáneamente la selección óptima de la estructura y el diseño de los equipos, No obstante, en general son eficaces para procesos simples, o bien para subsectores de los mismos, tales como se los ha indicado en la sección anterior en las figuras esquemáticas representando a composición sistémica de los procesos químicos.

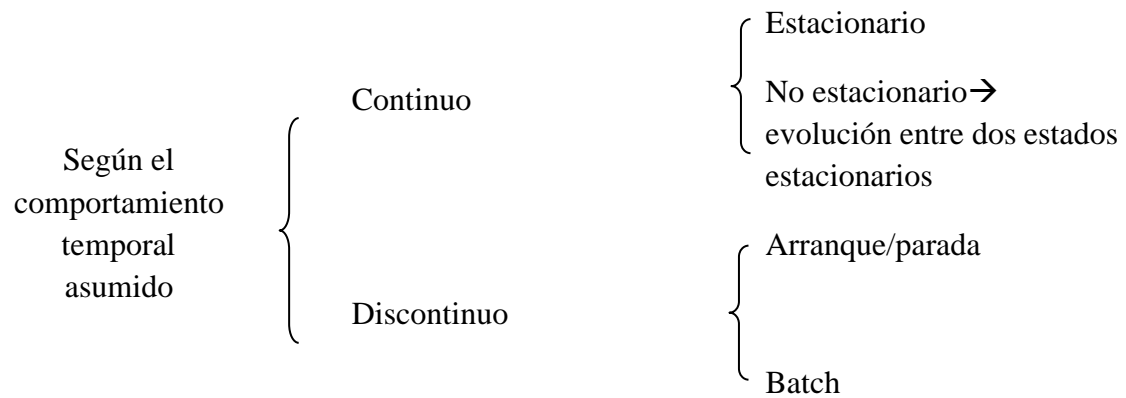
Cuanto más exhaustiva sea la tarea de síntesis para generar estructuras adicionales, mayor es el número de alternativas evaluadas, y mejor será la solución óptima hallada. Claro que también mayor será la tarea de evaluación de procesos alternativos.

Resulta evidente que es necesario contar con herramientas adecuadas para minimizar el tiempo de evaluación, y si es posible, para la generación de estructuras; aunque esta tarea es un poco más dificultosa, ya que la generación es un acto creativo y no es tan fácil automatizar esta tarea mediante un algoritmo computacional.

La tarea de evaluar la eficiencia de cada estructura generada se realiza normalmente, en la medida de lo posible, utilizando como se ha mencionado, la herramienta computacional llamada simulador de procesos químicos. En general, para implementar los sistemas informáticos para la simulación o la optimización de los procesos, se deben generar modelos de los mismos y luego mediante técnicas adecuadas, resolverlos computacionalmente. Si bien en la asignatura “fenómenos de transporte” se han desarrollado los conceptos y se han adquirido las habilidades / competencias para resolver analíticamente tales modelos; aquí será necesario por un lado, caracterizar el tipo de modelos que se utilizarán (dependiendo de las hipótesis que asumamos para la confección de los mismos), y por el otro, definir la estrategia para su resolución. Como expresamos más arriba en varias oportunidades, se utiliza programación a los efectos de resolver los modelos computacionalmente mediante algoritmos de ejecución iterativa. Esto implica que a falta de métodos analíticos, se deberá utilizar técnicas de análisis numérico que resultan fáciles de codificar en lenguajes de programación (y que son parte del contenido de una asignatura previa).

En síntesis, esquemáticamente, podemos entonces representar la tipificación o características de los distintos modelos a utilizar según el siguiente esquema:



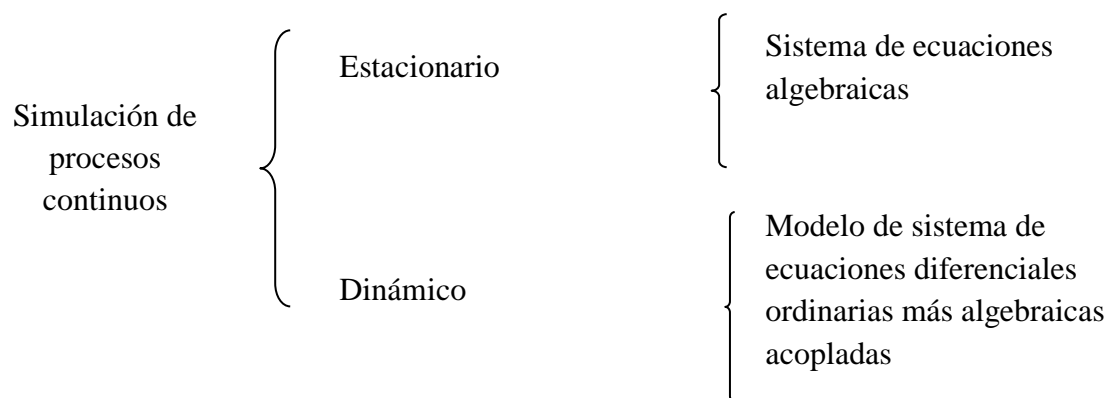


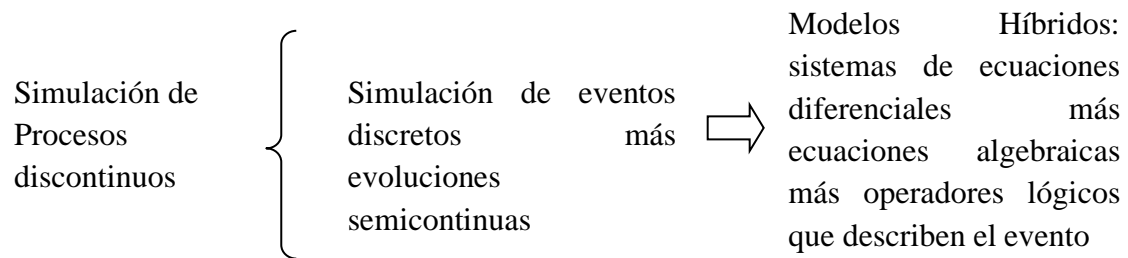
Se define en general;

Tarea de diseño: encontrar la estructura y el conjunto de valores (incluyendo aquellos que haya que especificar) para las variables operacionales y funcionales que satisfagan un criterio de óptimo y que cumplan con la restricción de sustentabilidad

Simulación: dada la estructura y los parámetros funcionales y valores de las corrientes de entrada al proceso (de manera de cumplir con los grados de libertad de los modelos que lo describen) resolver los balances de materia energía y/o cantidad de movimiento, de tal forma de calcular los valores de las corrientes de salida del proceso, y de todas las intermedias, al igual que los parámetros asociados a cada uno de los equipos.

En cuanto a los modelos asociados a cada equipo y al proceso completo, podemos encontrar, según las características o modos de operación, los siguientes tipos:





El problema se complica si tenemos en cuenta que (según ya hemos comentado), se deben incorporar los servicios, los cuales imponen además nuevas alternativas estructurales, por ejemplo el sistema de agua de enfriamiento, el de generación de vapor, energía eléctrica y potencia, el sistema de provisión de combustibles, aire comprimido y gases inertes, sistemas de almacenamiento, playones de carga y descarga, puertos -si se encuentra la planta en la ribera de curso de agua-, entre otros. A modo general, y solo para mostrar la magnitud del problema que cada uno de los servicios puede agregar, en las secciones siguientes se exponen resumidamente características de los principales sistemas de utilidades o servicios.

Servicios Típicos

- Agua (de proceso, para refrigeración, para calderas, limpieza, sanitaria, contra incendio..)
- Vapor (de alta, de media o baja presión)
- Condensados, sistema de intercambio y recuperación calórica.
- Fluidos térmicos (aceite, sales, agua, vapor, otros), Sistemas de generación y/o provisión.
- Combustibles (carbón, fuel oil, gas oil, gas natural, otros), sistemas de provisión / almacenamiento.
- Electricidad, Vapor y energía mecánica, provisión, generación, conexiones a la red eléctrica.
- Aire comprimido (instrumentación, servicio)
- Gases (nitrógeno, oxígeno, otros)
- Efluentes (tratamiento “in situ”), distintos tipos de residuos

Esquema indicativo de una estructura general típica de sistemas de generación de vapor, energía eléctrica por cogeneración (turbina de gas y de vapor) y provisión de potencia mecánica (mediante turbinas de vapor)

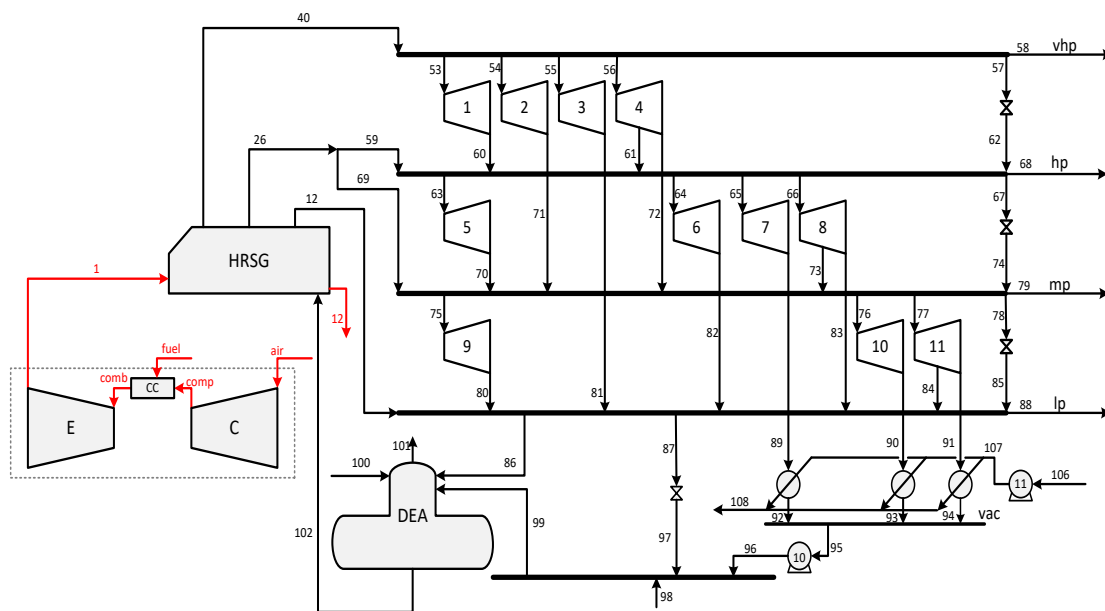
A modo de ejemplo, a continuación desarrollaremos someramente algunas características de un proceso típico para la provisión de “utilidades” (vapor, energía eléctrica y potencia mecánica). La tarea de síntesis y diseño de tales sistemas, por ejemplo plantas de cogeneración de energía eléctrica, vapor y potencia mecánica en industrias de procesos; es uno de los problemas más interesantes y a la vez complejos de resolver debido a los diferentes trade-offs (contraposiciones) existentes entre las principales variables para la optimización de tales sistemas.

En la literatura específica relacionada con la optimización de procesos químicos e industriales, se pueden encontrar diversos trabajos que abordan el estudio de

configuraciones y condiciones de operación de sistemas de utilidades/servicios aplicando diferentes metodologías de resolución, considerando distintos casos de estudio y asumiendo diferentes hipótesis de modelado como así también niveles de detalles en la descripción de los equipos.

En la Figura siguiente se presenta una estructura generalizada que incluye un ciclo combinado (equipos E y C) para la generación de energía eléctrica quemando gas natural, como parte de una planta de generación de servicios auxiliares (electricidad, potencia mecánica y vapor). Todos estos sistemas poseen al menos un recuperador de calor (gases de escape de la turbina de gas) para la generación de vapor. Este puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica (moviendo una turbina acoplada a un generador) o bien expandiéndolo en una turbina cuyo eje está acoplado a un motor (potencia mecánica). En general, el vapor se genera a distintos niveles de presión (de uno a cuatro niveles de presión), siendo lo más común en plantas industriales tres niveles, y el menos común un solo nivel (por su ineficiencia).

En la figura puede apreciarse el recuperador de calor (HRSG –Heat Recovery Steam Generator-), que cuenta con cuatro niveles de presión. En general se recurre al recalentamiento de vapor para mejorar la eficiencia del sistema.



Estructura general indicativa de las alternativas posibles para una planta de servicios auxiliares.

En el esquema se incluyen los distintos niveles de presión (muy alto -en la figura vhp o very high pressure-, alto -hp- medio -mp- y bajo -lp-); y diversas turbinas de vapor (numeradas de 1 a 11) a los efectos de proveer los requerimientos de vapor de intercambio de calor y de vapor húmedo para las necesidades del proceso. Obviamente se incluyen a modo indicativo, indicado una estructura que contiene un número muy elevado de posibilidades estructurales. A partir de una metodología y/o la implementación de un algoritmo de optimización eficaz; en el diseño final solo se adoptarán las necesarias para cubrir las demandas en el nivel de presión que corresponda y a las condiciones de operación que minimicen el costo de operación, según cada caso específico.

En cuanto a los otros equipos indicados en la Figura, en estos sistemas siempre es necesario un desaireador (DEA), bombas para el movimiento de condensados y las alimentaciones, y condensadores correspondientes a las distintas corrientes de vapores de cada nivel de presión. Existen indicadas, además, las válvulas necesarias para los flujos de los fluidos en cada cañería. En particular, se ubican válvulas para permitir la reducción de presión y el paso de vapor (para balancear las presiones en cada línea de vapor) entre las líneas de muy alta, alta, baja y muy baja presión (de existir), lo cual en principio es siempre necesario en la operación de cualquier proceso para balancear en todo tiempo las presiones correspondientes en cada línea de vapor.

En general, se contemplan en esta estructura generalizada diversos tipos de turbinas, según los modos de operación posibles:

1. Turbina de contrapresión descargando a media presión,
2. Turbina de contrapresión descargando a baja presión,
3. Turbina de contrapresión descargando a media y baja presión,
4. Turbina de condensación,
5. Turbina de condensación con extracción de vapor para nivel de media presión,
6. Turbina de condensación con extracción de vapor para nivel de baja presión

Nuevamente, en un diseño específico, y según las especificaciones y necesidades, solo algunas serán adoptadas en el diseño (son las adecuadas para cada caso particular). Pueden de igual manera ubicarse motores eléctricos o impulsados con vapor (descarga de una turbina de vapor) para satisfacer parcial o totalmente las demandas de potencia requeridas.

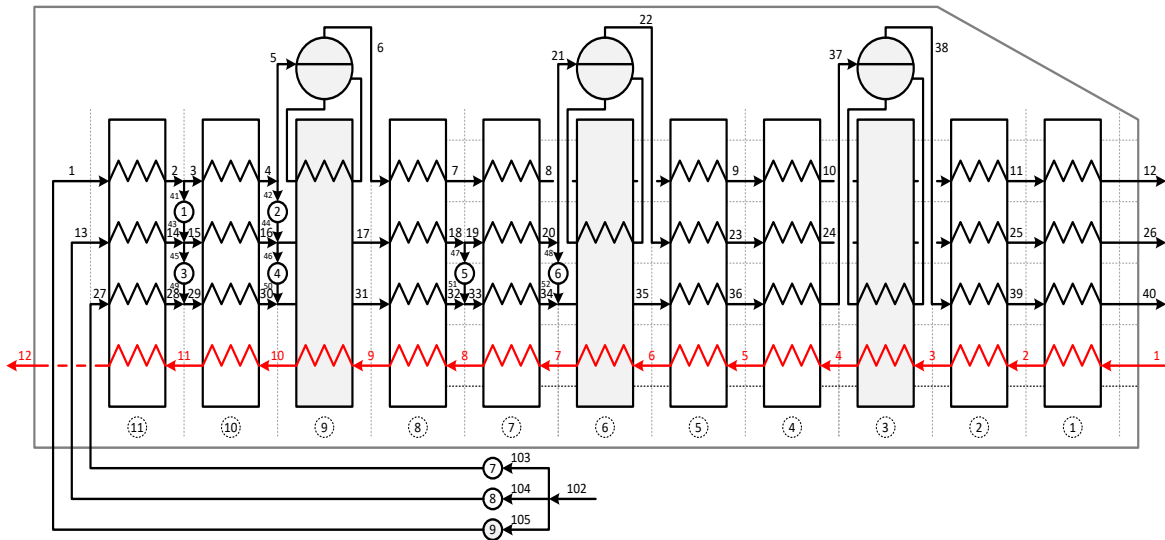
Este es justamente el problema de diseño, seleccionar la mejor opción entre todas las posibles. Es necesario determinar el número de calderas convencionales y turbinas de vapor considerando como función objetivo la minimización del costo total de operación. Las calderas deben ser modeladas en forma rigurosa considerando por ejemplo correlaciones para tener en cuenta la variación del coeficiente global de transferencia y las curvas de cargas-eficiencia en cada una de las calderas. También es necesario seleccionar las condiciones de presión y temperatura de los cabezales en las líneas de muy alta, alta, media y baja presión considerando como decisiones discretas (existen o no existen) equipos candidatos tales como motores eléctricos y turbinas de vapor.

En este caso se supone que el vapor es generado solamente a través del HRSG (a diseñarse para generar vapor a todos los niveles de presión) mediante la descarga de los gases de la turbina de gas del ciclo combinado (se llama así debido a que la energía eléctrica demandada se produce parte por la turbina de gas y parte por una o más turbinas de vapor que impulsan los correspondientes generadores asociados).

Se debe determinar no solo la configuración óptima, en especial la de HRSG, sino la del sistema en general (disposición de cada tipo de turbinas y válvulas de expansión). El problema que se propone resolver puede definirse de la siguiente manera: *Dado un conjunto de demandas de vapor, energía eléctrica y potencia mecánica (parámetros del problema), seleccionar la configuración óptima a partir de considerar todas las alternativas que se encuentran embebidas en ambas figuras (una general y la otra representando la estructura interna del HRSG); y determinar las condiciones de*

operación y tamaños de los equipos, de tal manera que el consumo de combustible requerido por la turbina de gas resulte mínimo, o el costo total resulte mínimo.

Nótese que las demandas del proceso (que no están incorporadas en el diagrama) surgen de los balances de materia y energía que se resuelven en general en una etapa previa. Se disponen luego las demandas de energía térmica, eléctrica, mecánica, entre otras; a satisfacer mediante compra a la red de provisión eléctrica y/o mediante generación propia, al igual que el vapor para calefacción. También debe optarse entre motores eléctricos, o en su defecto movidos por turbinas a vapor, según convenga en el diseño.



Desarrollo de las posibles estructuras para el HRSG indicado en la planta de servicios auxiliares.

Si bien la elección de cada alternativa estructural parece complicada, existen para cada tipo de operación o sistema, una serie de guías o heurísticos (principios genéricos) que permiten postular o fundamentar decisiones. Por ejemplo, la planta de servicios auxiliares debe satisfacer una demanda de electricidad y/o varios requerimientos de potencia mecánica. En general la potencia mecánica debe ser producida por una única turbina de vapor mientras que la generación de electricidad puede ser fruto de varias turbinas de vapor junto con la de gas (pueden sumarse sus potencias generadas). Es decir, si una turbina de vapor debe satisfacer una demanda de potencia mecánica su potencia debe ser exactamente la solicitada. Esto nos permite identificar el tipo de turbinas a ubicar, y su número, según las opciones que se van adoptando.

Por otra parte, en los casos del vapor, no conviene sobredimensionar la producción en los niveles superiores, ya que luego deberán pasar al nivel inferior expandiéndose en válvulas, sin producir trabajo alguno. Es conveniente el paso previo por una turbina para generar electricidad o bien para mover un dispositivo o motor.

Resulta muy importante, para la selección del tipo o estructura del sistema de generación de servicios a diseñar, el proceso al cual se acopla. Por ejemplo, no es lo mismo plantas con excedente de energía que aquellas con déficit. Es necesario considerar que para los procesos con reacciones exotérmicas, con mucha energía excedente, o debe utilizarse mucha agua de enfriamiento, lo cual tiene un costo, o bien se aprovecha dicho calor excedente para generar vapor para luego alimentar un sistema de generación como

el de la figura. Esto también sucede en plantas de papel, o de alcohol a partir de caña de azúcar (quema de residuos como el bagazo, o madera, etc), entre otras. Por el contrario, en plantas donde se consume mucha energía eléctrica, el problema está en decidir entre el costo de generarla o comprarla a la red. *En el caso de generación, debe diseñarse el sistema. Nótese que también deben considerarse factores de confiabilidad, por ejemplo entre la disponibilidad de la energía de red, y la generada por sistemas propios.*

Debe notarse además, que en todos los casos, toda energía calórica en exceso debe luego ser degradada en el proceso, por lo que deberá utilizarse el sistema de enfriamiento. Esto implica un costo de combustible y otro de enfriamiento. Existen técnicas de análisis termodinámico del proceso para minimizar simultáneamente el gasto de vapor y otros fluidos de calentamiento y el gasto de agua y otros fluidos de enfriamiento. Esto se consigue maximizando el intercambio entre las corrientes de proceso, en los llamados sistemas de intercambio calórico, o redes de intercambio calórico del proceso. En particular, todas las corrientes en el proceso que deben enfriarse (llamadas corrientes calientes) y las que deben calentarse (llamadas corrientes frías) deben primero agotar el intercambio entre sí, para luego utilizar vapor o agua de enfriamiento.

Sistemas de Servicios de Enfriamiento

Los servicios de enfriamiento en procesos industriales pueden ser de diversa índole, en particular dependiendo del nivel de enfriamiento requerido. Mientras pueda utilizarse agua, por ser más barata, se habilitan circuitos con agua tratada adecuadamente. En general se utilizan torres de enfriamiento para enfriar el agua luego que ésta intercambie calor en los intercambiadores, enfriando las respectivas corrientes que deben ser acondicionadas por necesidades del proceso. Se pueden citar reacciones exotérmicas, acondicionamiento de productos, condensación de vapores en los toques de las columnas de destilación para producir el reflujo necesario para la separación, entre otros servicios.

El acondicionamiento del agua implica, luego de tomarla de los cursos linderos (ríos, lagunas o bien de pozo si no existen estos recursos) el filtrado, la floculación y decantación, y según el servicio requerido (por ejemplo para aguas de calderas debe demineralizarse), se deben realizar otras operaciones de acondicionamiento. Para evitar problemas por contaminación biológica, en particular en la torre de enfriamiento, se debe además adicionar una serie de aditivos al circuito de agua de enfriamiento. Esto implica, en principio, diseñar un circuito de agua de enfriamiento que como mínimo disponga de la toma de agua, la torre de enfriamiento (uno o varios cuerpos, de tiro forzado o natural, entre otras alternativas), los sistemas de acondicionamiento y de incorporación de aditivos mencionados; y obviamente, el sistema de intercambiadores de calor en los cuales el enfriamiento de las corrientes de proceso es realizado.

En general, esto define una red de intercambio calórico, en la cual todas las corrientes de proceso que lo necesiten intercambian calor con las corrientes de agua de enfriamiento. Dado que la temperatura a la que regresa el agua de enfriamiento es superior a la ambiente, la disponibilidad de agua a temperatura adecuada para el enfriamiento depende del buen funcionamiento de la torre de enfriamiento, lo cual implica que está limitada a la temperatura que logre la misma, que depende de la estación del año - temperatura, humedad, presión- ya que el agua caliente que retorna del proceso se enfría en la torre intercambiando en contracorriente con una corriente de aire.

Al salir de la torre de enfriamiento la corriente de agua a temperatura adecuada debe ser impulsada a la red de intercambiadores, diseñada de tal forma que flujos y temperaturas intermedias sean las requeridas para lograr temperaturas adecuadas para el intercambio en cada corriente del proceso. Pueden bifurcarse corrientes, entre otras alternativas estructurales para lograr el enfriamiento requerido aún en las peores condiciones (verano, humedad y temperatura máxima en el ambiente) con el agua tratada en la torre de enfriamiento. Sea como sea la estructura diseñada, debe considerarse que todo el sistema consiste en un circuito cerrado, en el cual el agua toma calor a medida que se intercambia en los distintos intercambiadores (enfriando las corrientes servidas por el circuito) para luego volver a tomar una temperatura adecuada enfriándose en la torre de enfriamiento.

Si esto no es posible, por ejemplo por el nivel de temperatura requerido por algunas de las corrientes a enfriar, debe recurrirse a fluidos de enfriamiento especiales. Por ejemplo salmueras, que al agregar sales tienen un punto de congelamiento menor, y se puede entonces bajar la temperatura por debajo de cero grado centígrado. Es necesario obviamente un sistema de refrigeración para lograr las temperaturas adecuadas. Si es más bajo el nivel requerido, puede recurrirse a circuitos de refrigeración con amoníaco. Si el nivel solicitado fuera más bajo aún, por ejemplo en la industria petroquímica, donde para la obtención de metano, etano o etileno se deben lograr en los topes de las torres de destilación temperaturas de -40 grados centígrados o menores; debe recurrirse entonces a hidrocarburos con adecuado punto de congelamiento, tales como etano, metano, etc (sistemas criogénicos).

Por lo tanto, los sistemas de refrigeración o enfriamiento son complicados de diseñar ya que constituyen una parte importante del costo operativo y de inversión en el proceso, por lo que deben optimizarse, y además, modelarse rigurosamente para minimizar los errores de estimación. Nótese que son comunes en todas las industrias, no solo las petroquímicas. Por ejemplo, todas las industrias del área “alimentos”, necesitan sistemas de refrigeración confiables y de gran capacidad. Generalmente se utilizan sistemas en base a amoníaco.

Diseño Sistémico de Procesos. Ingeniería Conceptual y de Detalle

En general, ya sea para un proceso, o para sus sistemas de provisión de servicios, la evaluación de cada alternativa implica resolver los balances de materia, energía y cantidad de movimiento. Esto permite verificar consumos energéticos, desechos, flujos de materiales y productos, y por lo tanto, el pre-diseño de los equipos para estimar su costo de inversión.

De esta manera, se logran los datos para calcular los costos de operación y de inversión, y por lo tanto, la rentabilidad y el tiempo de recupero de la inversión. Luego, se pueden comparar las distintas alternativas posibles para el proceso en función de su tasa de retorno de la inversión. Por lo tanto, es posible, si se cumple con todas las restricciones legales y tecnológicas, seleccionar la solución (alternativa o estructura para el proceso) de menor tiempo de repago (o mayor rentabilidad) como base para el diseño definitivo.

Las tareas descritas más arriba conforman la llamada ingeniería conceptual, que luego se continua con el desarrollo de la ingeniería de detalle. Se estiman con cierto margen de error los valores de los flujos, energías intercambiadas, temperaturas y composiciones de todas las corrientes que se involucran en el proceso, para la alternativa estructural o diagrama de flujos seleccionado para el mismo; así como también las fuerzas impulsoras y los consumos de energía involucrados en cada equipo. También se realiza un pre-diseño de los equipos y de los sistemas de almacenamiento, las cañerías y accesorios, sistemas de bombeo, provisión de servicios y los sistemas de control, instrumentación y sistemas de supervisión, seguridad, mantenimiento, etc.

A partir de este punto, ya seleccionada la alternativa definitiva, y por lo tanto el flowsheet, para realizar la ingeniería de detalle. Esta es la base para la construcción de cada equipo y de la planta, y la guía para generar los procedimientos para la posterior puesta en marcha y los distintos procedimientos para el normal funcionamiento. Se comienza con la consolidación de la ingeniería, profundizando y detallando el diseño específico de cada equipo, minimizando los costos. Se incorporan, diseñan, estiman dimensiones, accesorios, fundaciones, soportes, tipos de materiales, instrumentación detallada para el control, espacios para ingreso – egreso, dispositivos para la puesta en marcha y parada, para la toma de muestras, entre otros aspectos cruciales de diseño.

Es decir, se generan una serie de planos que evolucionan (según la etapa de diseño y grado de avance) conteniendo más información y detalles constructivos, desde el diagrama de flujo del proceso hasta una serie de planos detallados llamados P+I+D (diagrama de proceso, cañerías e instrumentos). También se definen una serie de documentos tales como manuales de operación, de puesta en marcha, de control y supervisión, entre otros. Se definen también, además de los sistemas de control, los de seguridad (alarmas, conexiones entre sala de control y los distintos sectores de la planta), sistemas de alivio de presión, sistemas anti-incendio, antorchas, cortinas de agua ante fugas de gases tóxicos, entre otros sistemas pasivos o activos para mitigar las consecuencias provocada por eventuales accidentes mayores.

En la próxima sección se describirá en forma sucinta los distintos tipos de procesos químicos en función de la rama de producción asociada. Es sabido que existen un número muy grande de posibles procesos para obtener cada producto. Además, existen muchos (y cada vez más) productos en el mercado, creciendo su número exponencialmente debido a la innovación permanente.

Esto implica que es imposible enumerar y analizar cada caso particular, sino que se impone una visión sistémica de la ingeniería de procesos. En particular, rescatar los elementos comunes y los principios generales de diseño asociados a tales elementos, desde un punto de vista sistemático.

Hemos comentado que la tecnología se crea (innovación), se proyecta (diseña), se adapta, se compra, se vende, se selecciona. Hemos mencionado además la necesidad de un procedimiento sistemático de diseño, y de la disponibilidad de herramientas adecuadas para realizarlo. Es por ello necesario definir los formalismos y documentos asociados que se esperan como resultado de tales tareas.

¿Cómo se “adquiere un proceso químico?”

¿Será un listado, una idea, o bien el diagrama de flujos, y los P+I+D junto a toda la

documentación descriptiva?.....

Cuáles son las etapas o fases de un proyecto para la instalación de una planta nueva?
 ¿se compra solo el “proceso”, planos, know-how, o también la planta y su instalación, con puesta en marcha o sin ella?
 Puede ser que el vendedor solo transfiera los planos y manuales por un lado, y la construcción sea realizada por la empresa compradora, o encargada a un tercero?
 Cómo se comunican entre sí?
 Cuál es la documentación oficial que se adopta?

En general, los siguientes son documentos típicos asociados a la caracterización y definición de una tecnología o proceso químico:

- Manuales descriptivos del proceso
- Manuales de su operación
- Manuales descriptivos de la Instrumentación y control
- Documentos de descripción y datos de equipos
- Manuales de puesta en marcha y parada y modos de operación del proceso
- P+I+D (diagrama de procesos, cañerías e instrumentos)

Caracterización y Representación de Procesos Industriales

Hemos visto que en la etapa de diseño conceptual y de detalle, se van generando distintos tipos de planos y documentos.

¿Cómo se representa un proceso químico?

Por planos que tienen distintos grados de complejidad y de profundidad de detalle (información del proceso). Existen distintos niveles o tipos de representaciones, asociadas a la etapa de diseño del proceso:

Diagramas en bloques

Diagramas de Flujo

Diagrama de proceso, cañerías, instrumentos (P&ID o P+I+D)

Diagramas Isométricos (cañerías y la conexión entre equipos)

Debe tenerse en cuenta que es imposible confeccionar los planos y documentos aquí referenciados (excepto el diagrama de bloques más sencillo) sin completar la etapa de síntesis y luego la simulación y análisis (optimización) del proceso, finalizando la etapa de la ingeniería conceptual (flowsheet o diagrama de flujos). Luego, agregando más detalle al diseño, según se ha comentado más arriba, se define la ingeniería de detalle, culminando con la confección de los P+I+D.

En la figura siguiente se indica la secuencia de tareas de diseño en la ingeniería de procesos, y los planos que resultan de la culminación de cada etapa.

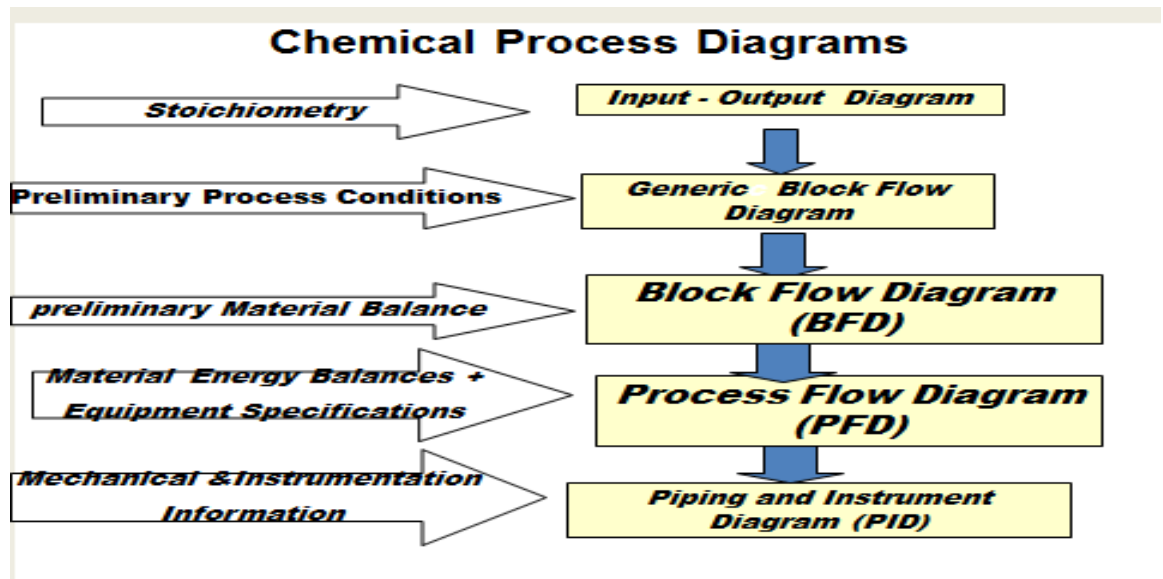


Diagrama en Bloques. Algunas Convenciones para los Diagramas de Bloques

Operaciones: se representan por bloques

Corrientes de flujo principal: se representan por líneas orientadas en la dirección del flujo

Flujos: desde izquierda a derecha del diagrama

Corrientes gaseosas: en la parte superior del diagrama,

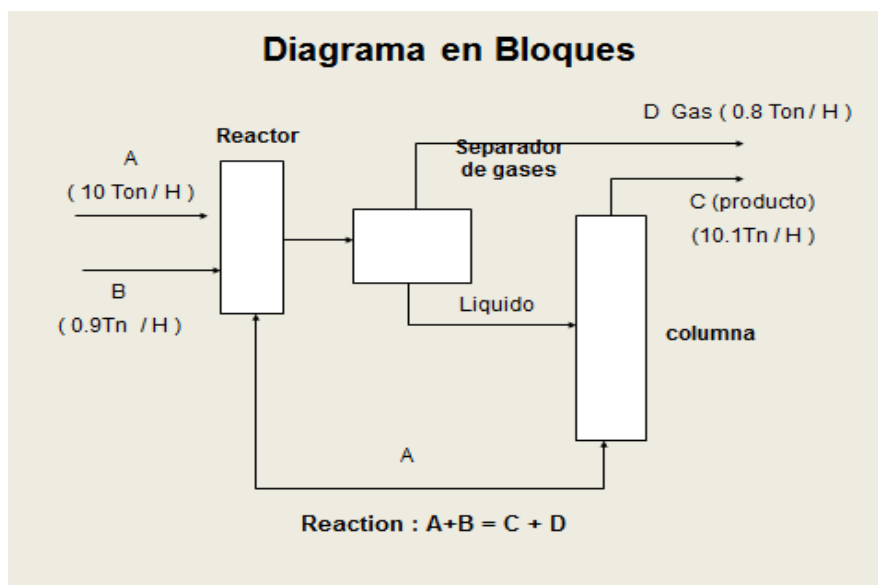
líquidos o sólidos: parte inferior (segregar por densidad).

Se incluye la información crítica para entender el proceso

Si las líneas se cruzan, las horizontales se mantienen y las verticales se cortan

Se suele incluir un balance de masas y energía simplificados en forma de una tabla.

Ejemplo típico de procesos representados mediante diagrama de bloques:



además del diagrama de flujos del proceso, son la lista de instrumentos, la lista y detalle de todos los equipos, el piping y los isométricos, entre otros.

Son planos fundamentales para el análisis de peligros y riesgos (HAZOP), el arranque y parada, las operaciones rutinarias del proceso, para diagramar el mantenimiento, etc.

A continuación, y solo para resaltar la enorme diferencia entre los planos anteriores y éste, el P&ID, se resaltan algunas características relevantes del mismo, así como ciertas guías para su construcción. Debe tenerse en cuenta que solo son un conjunto resumido y selectivo de las guías sistemáticas para realizar este tipo de plano. Para el caso, debe recurrirse a bibliografía específica y completa para el diseño de los mismos.

Algunas consideraciones de interés:

- Error que se incorpore en el P&ID's puede trasladarse al diseño, construcción y operación del proceso.
- Los P&ID deben incluir los detalles y aspectos mecánicos relevantes de la planta.
- Para cada flowsheet representativo de un proceso (diagrama de flujo del proceso) pueden surgir (dado el grado de detalle) varios P&IDs para representarlo.

Convenciones para la construcción de los P&IDs

Para los equipos debe mostrarse cada detalle

Deben incorporarse las unidades en spare (o paralelo)

Detalles relevantes de cada entrada / salida de cada unidad

Para las líneas deben incluirse detalles y drenajes, puntos de muestreo, conexiones, y *deben especificarse:*

tamaño (usar tamaños estándar)

schedule (espesor)

materiales de construcción

asilamiento (tipo y espesor)

Para los instrumentos especificar:

Indicadores

Registadores

Controladores

Líneas de instrumentos

Para las utilities identificar:

Entradas de las líneas de servicios

Líneas de salidas de servicios

Líneas de salida de los desechos y diagramas de las plantas de tratamiento

Procedimiento para la construcción de los P&ID's

Se comienza con los Diagramas de Flujos del proceso definitivamente aprobados y oficiales

Se debe tomar como referencia cada equipamiento mayor o principal en un plano separado.

Asignar a cada ítem un código o tag, por ejemplo si asignamos a los tanques la identificación T, al primer tanque podemos codificarlo como T-1

Desarrollar todas las líneas del flow sheet, y agregar las que correspondan al grado de detalle del P+I+D.

Ubicar las corrientes que entran desde la izquierda y desarrollar el plano hacia la derecha, ubicando allí las corrientes que salen

Asignar números / códigos a cada fuente, línea, plano, para establecer las conexiones entre cada uno.

Asignar en el plano para cada línea las características correspondientes (por ejemplo la

primera línea desde el tanque T-1 puede ser codificada T1-1-3"-CS, la segunda T1-2-6"-316SS). Aquí vemos el espesor y el material, además de la codificación de la línea.

Es importante que el plano contenga como mínimo:

Número / identificación de cada corriente/línea

Temperatura (°C)

Presión (bar)

Fracción vapor

Flujo total másico (Kg/h)

Flujo molar total (Kmol/h)

Flujo molar para cada componente (Kmol/h)

Es aconsejable incorporar además:

Fracciones molares de los componentes

Fracciones másicas de los componentes

Flujo volumétrico

Propiedades físicas (densidad , viscosidad...)

Datos termodinámicos (calor específico, entalpía...)

Los planos P&ID son la última etapa del diseño y sirven como guía para quienes tengan que habilitar el diseño final y quienes toman a su cargo la construcción de la planta.

En base a los planos P&ID:

Los ingenieros mecánicos y civiles diseñarán e instalarán las fundaciones y los equipos

Los ingenieros de instrumentación y control especificarán, instalarán y comprobarán el funcionamiento de los sistemas de control y los sistemas asociados

Se desarrollarán los sistemas de cañerías, los de bombeo, los isométricos, los diagramas en planta y los distintos cortes, y el layout de planta.