

1 INTRODUCCIÓN

Motivación

Sin profundizar en la multiplicidad de tareas que puede encarar un Ingeniero de Procesos, podemos señalar algunas áreas esenciales de su campo de acción: en primer lugar el diseño o adaptación de procesos y equipos, esto es, la selección de los mismos, las conexiones entre los diferentes componentes, su dimensionamiento. En general, para procesos en flujo tales como los que encontramos en la industria química o petroquímica, el diseño se realiza para condiciones de trabajo en estado estacionario, sin variaciones en el tiempo de las variables que caracterizan al sistema.

En segundo lugar, como el Ingeniero se ocupa de la operación de esos procesos, debe realizar las acciones necesarias para que los procesos o equipos operen en las condiciones de diseño. Esto ya implica considerar otros factores que no aparecen en el análisis de estado estacionario, tales como la estabilidad de los puntos de trabajo, las variaciones que puedan ocurrir en las entradas al sistema y períodos especiales de funcionamiento (arranques, transiciones de un punto de operación a otro). Vemos entonces que las variaciones en el tiempo de las condiciones del proceso o equipo deben ser estudiadas para poder tener un gobierno del mismo. Es más, existen procesos que son esencialmente variables en el tiempo: los procesos discontinuos (batch) o semicontinuos.

En tercer lugar, muchas veces no alcanza con conocer el comportamiento dinámico del sistema para garantizar que sea operable, por lo que se deben encarar acciones de control. Esto es, manejo de ciertos parámetros o variables que garanticen que el sistema opere en las condiciones deseadas. Para ello resulta clave conocer cuál es la respuesta dinámica del sistema a los cambios que se introduzcan. Si esto se realiza sin la intervención directa de un operador estamos frente al control automático del proceso.

Vemos entonces que el estudio de la dinámica del proceso presenta una gran importancia por varias razones: i) hay sistemas que no funcionan en estado estacionario; ii) aún los sistemas en flujo, diseñados para trabajar en estado estacionario, pueden recibir pequeñas perturbaciones que los aparten del punto de diseño, y por lo tanto es necesario evaluar la estabilidad del mismo; iii) los sistemas en flujo tienen períodos de puesta en marcha o transiciones de un punto de operación a otro; iv) conocer la dinámica del proceso nos permite diseñar de mejor modo el sistema de control y eventualmente implementarlo en automatismos.

Los conceptos esbozados más arriba son sumamente generales y no se restringen solamente a procesos industriales. Si bien en lo que sigue aparecen normalmente ejemplos de aplicaciones tales como reactores, intercambiadores, tanques, etc. esto es fundamentalmente por sencillez y por considerar sistemas ya conocidos por el estudiante. El objetivo principal es conocer el comportamiento dinámico de los sistemas y cuando se analicen los sistemas de control se hará desde esta perspectiva; la implementación de los automatismos queda en manos de los especialistas correspondientes, con los cuales el Ingeniero de Procesos deberá poder interactuar desde el conocimiento del proceso y su dinámica.

Operación de un proceso

Veamos un ejemplo muy sencillo: un tanque de alimentación de un fluido es alimentado en forma continua con un caudal constante y en la cañería de salida hay una válvula para regular el caudal (Figura 1.1)

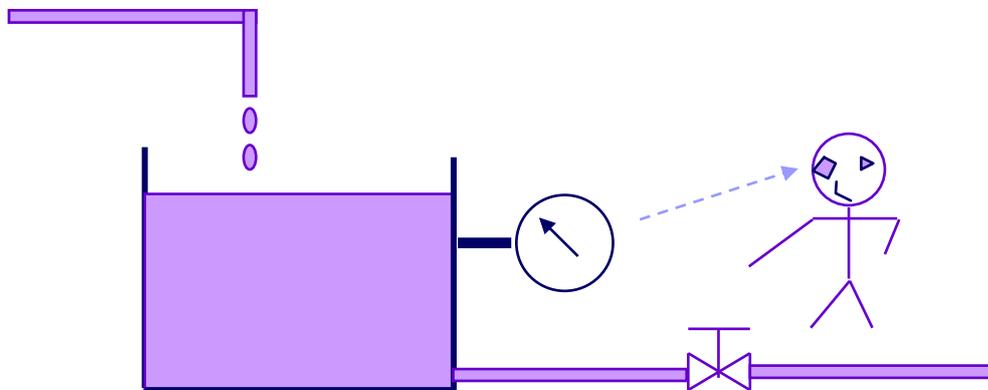


Fig. 1.1 Un tanque de líquido con alimentación constante. Para asegurar que el tanque no desborde ni se vacíe es posible actuar sobre una válvula ubicada en la cañería de salida.

El operador deberá cuidar el llenado del tanque de manera que no se desborde ni se quede vacío. Para ello deberá observar el nivel del tanque, visualmente o con algún instrumento de medida y comparará su observación con los niveles de referencia. A partir de esa comparación, y de acuerdo con algún criterio, deberá decidir una acción sobre la válvula, abriéndola o cerrándola. Vemos que aparecen en este sencillo ejemplo cuatro pasos que el operador debe seguir: observar, comparar, decidir y actuar.

En general un proceso cualquiera recibe determinadas cambios en las entradas o “inputs” y genera determinadas respuestas de salida o “outputs” (Figura 1.2). Cabe aclarar que cuando hablamos de entradas y salidas no hablamos necesariamente de flujos materiales; por el contrario nos estamos refiriendo a *flujos de información*, que podrán coincidir o no con flujos materiales. En este sentido, las entradas son elementos que el operador puede definir o modificar, en tanto que las salidas están determinadas por las respuestas del sistema a determinadas condiciones de entrada.



Fig. 1.2 Un proceso concebido como “caja negra” que recibe ciertas entradas y genera ciertas respuestas (concebidas como flujo de información).

El observador deberá medir esas respuestas, compararlas con algún valor predeterminado y decidir acciones sobre las entradas al proceso. Se cierra así un ciclo que permite operar sobre el sistema para lograr algún objetivo determinado (Figura 1.3). Conocer la respuesta dinámica del sistema (esto es, cómo responde a lo largo del tiempo) a cambios en las condiciones de entrada es de gran utilidad para el manejo del sistema.

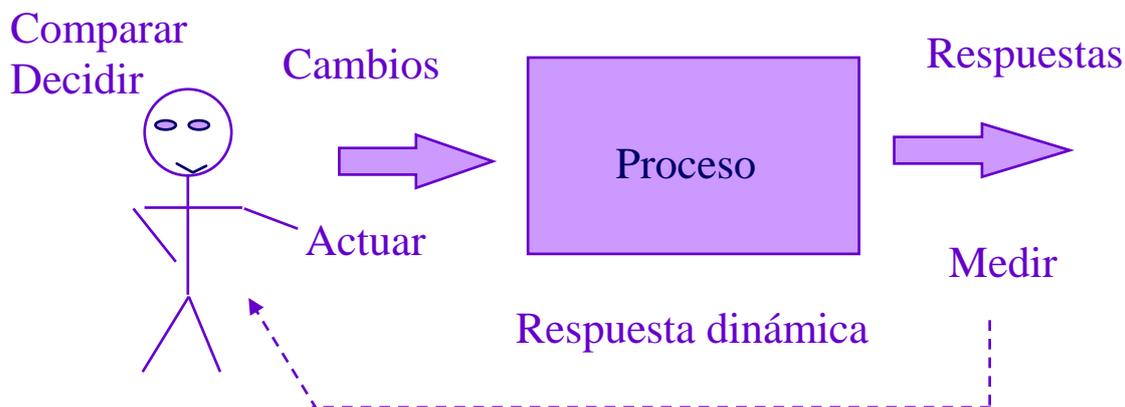


Fig. 1.3 El operador debe medir las respuestas del proceso, compararlas respecto a sus objetivos y decidir una acción que provoque cambios en la entrada de manera que el proceso ajuste sus salidas.

El ciclo anterior puede concretarse mediante la intervención manual de un operador, pero convendrá desarrollar sistemas que lo realicen en forma automática. Esto implicará la instrumentación del sistema utilizando un elemento de medida (sensor), un elemento de comparación y decisión (controlador) y un elemento que modifique alguna entrada al sistema (actuador), conectados de la manera apropiada. En el caso del tanque de líquido, por ejemplo, colocaremos un sensor de nivel (LT, “level transmitter”) conectado a un controlador (LC, “level controller”) que actuará sobre una válvula que regule el flujo que sale del tanque cuando le fijemos el nivel deseado (Figura 1.4). Obsérvese que en este caso estamos considerando al flujo de líquido que *sale* a través de la válvula como una variable de *entrada*, mientras que la *salida* del sistema no es ningún flujo material de salida sino el nivel de líquido.

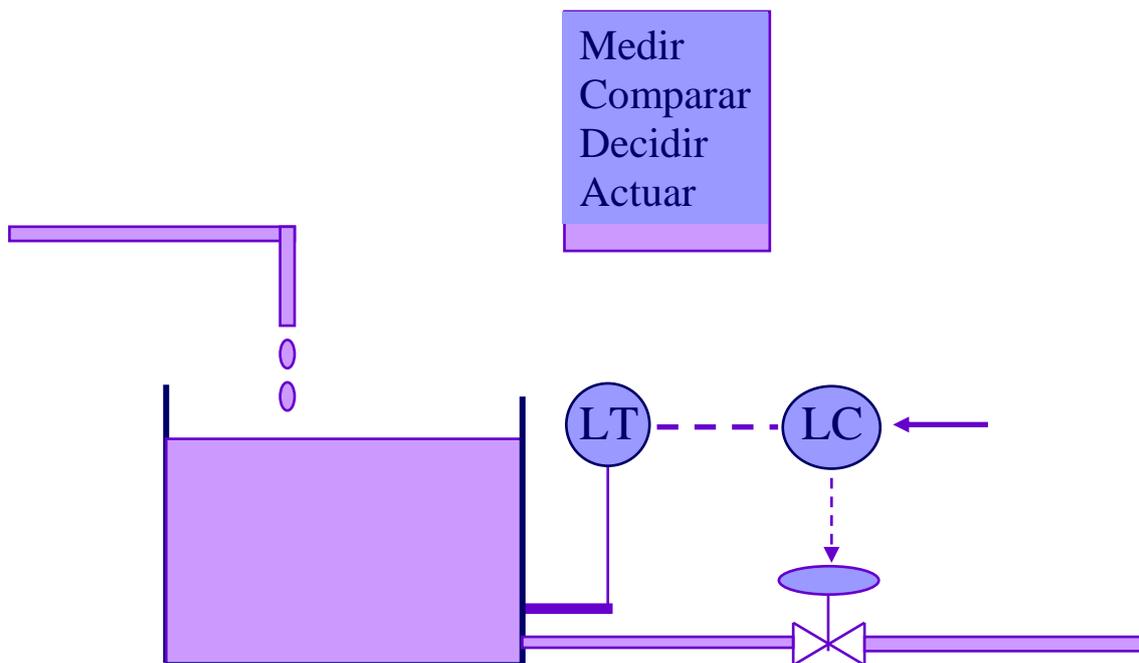


Fig. 1.4 El mismo sistema de la Figura 1 instrumentado automáticamente: LT, “level transmitter”, LC, “level controller”.

En términos más generales el esquema de la Figura 1.5 nos muestra los componentes principales de un ciclo de control por retroalimentación o “feedback”.

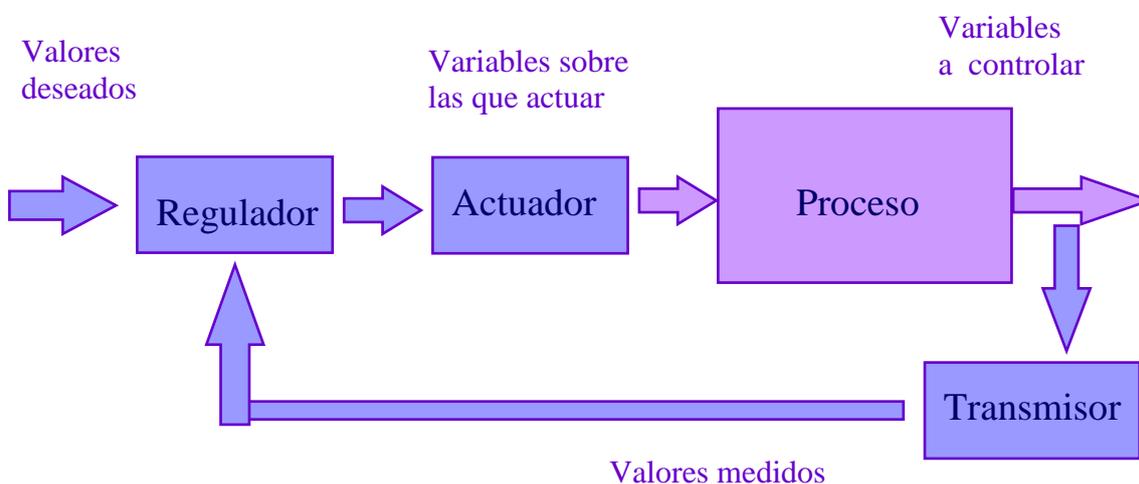


Fig. 1.5 Esquema general de un ciclo de control por retroalimentación.

En este curso nos concentraremos en dos aspectos principales: i) la comprensión del comportamiento dinámico del proceso frente a cambios en las condiciones de entrada, y ii) la comprensión de la dinámica del sistema luego de haber incorporado los elementos de regulación o control.

Un ejemplo aclaratorio

Consideremos un tanque calefactor de agua que es calentado mediante una resistencia eléctrica (Figura 1.6). El tanque tiene un volumen de líquido V , recibe una corriente de entrada de caudal w y temperatura T_{in} y presenta una salida de caudal w (igual al de entrada, con lo cual V es constante) y temperatura T , recibiendo a través de la resistencia un flujo de calor Q . Supongamos que nuestro objetivo es mantener la temperatura de salida del tanque T en un nivel de referencia T_R .

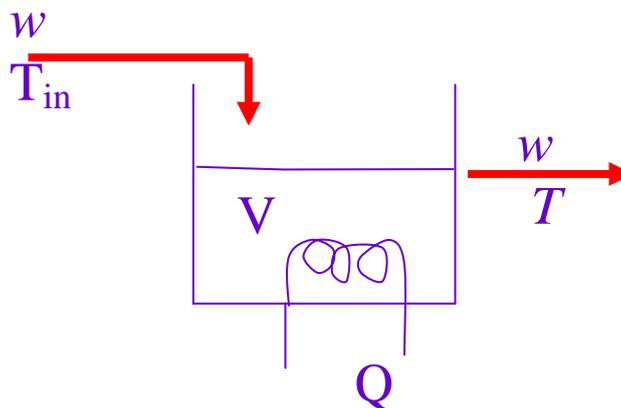


Fig. 1.6 Tanque de líquido calefactor.

Una primera pregunta que podríamos hacer es la siguiente: ¿Cuánto Q debe suministrarse para tener una temperatura de salida T_R ? Para contestarlo, realizaremos un balance de energía en estado estacionario, donde asumimos que el tanque está perfectamente agitado y no hay pérdidas de calor; entonces no hay gradientes en el interior del tanque y la temperatura de salida es igual a la del interior.

$$Q_s = w_s C_p (T_s - T_{in,s})$$

donde el subíndice s significa en estado estacionario (“steady state”). Como queremos $T = T_R$

$$Q_s = w_s C_p (T_R - T_{in,s})$$

Esto que acabamos de realizar nos sirve para *diseñar* el equipo. Pero supongamos que el equipo ya está diseñado y construido y ocurrieron cambios en la temperatura de la corriente de entrada (por ejemplo por cambios en un proceso anterior). ¿Cómo asegurar que la temperatura de salida siga siendo igual a la temperatura de referencia?

Pueden idearse al menos ocho estrategias diferentes:

- Medir T y ajustar Q (si T es alta, bajamos Q y viceversa)
- Medir T_{in} y ajustar Q (si T_{in} es alta, bajamos Q y viceversa)
- Medir T y ajustar w (si T es alta, aumentamos w)
- Medir T_{in} y ajustar w (si T_{in} es alta, aumentamos w)
- Medir T y T_{in} y ajustar Q (combinación de a) y b))
- Medir T y T_{in} y ajustar w (combinación de c) y d))
- Colocar un intercambiador a la entrada
- Usar un tanque más grande que “absorba” las variaciones

Las alternativas a) y c) son un ejemplo de control “feedback” o por retroalimentación: se mide la variable a controlar y se manipula una variable de proceso. Las alternativas b) y d) son ejemplo de control “forward” (“por adelantado”): se mide la perturbación y se manipula una variable de proceso. Las alternativas e) y f) son ejemplo de control “feedforward”: se miden simultáneamente la perturbación y la variable a controlar y se manipula una variable de proceso. Finalmente las alternativas g) y h) son en realidad un rediseño del sistema e implican agregar o sustituir equipos, por lo que en realidad no son factibles de ser utilizadas para un control automático del proceso.

Seleccionada la alternativa de control se abren dos caminos posibles: por un lado, instrumentar el lazo de control y recurrir al ajuste empírico o por tanteo de los parámetros del controlador (sintonía o “tuning”); por otro lado, recurrir a modelos del proceso que nos permitan: i) diseñar el sistema de control teniendo en cuenta la respuesta que cabe esperar del proceso, ii) realizar la simulación del sistema con o sin lazo de control, y iii) incorporar el modelo al funcionamiento del sistema de control.

El sencillo ejemplo anterior nos da la pauta de que no existen recetas únicas para lograr un propósito determinado. La Figura 1.7 nos muestra un esquema conceptual del desarrollo de un sistema de control. En general lo primero que debe hacerse es formular claramente los objetivos de control (en este caso, que la temperatura de salida del tanque sea un valor determinado) para lo cual normalmente se parte de consideraciones técnico-económicas (objetivos de gestión) y de información preexistente. Formulados los objetivos podemos desarrollar el modelo del proceso, que puede tener un alcance diverso, en concordancia con dichos objetivos; en la medida de lo posible se tratará de que esté basado en principios físicos y químicos pero también puede recurrirse a modelos empíricos; junto con los datos de planta nos servirá para realizar simulaciones en computadora que permitan visualizar el comportamiento dinámico del proceso. Conocido el comportamiento dinámico del proceso pasamos a delinear la estrategia de control (en el ejemplo del tanque calefactor, elegir la alternativa) incorporando la teoría de control junto con la experiencia previa del sistema en particular. Nuevamente podemos realizar simulaciones en computadora, incluyendo ahora no solo el proceso propiamente dicho sino también los elementos de control. Seleccionada y evaluada la alternativa de control lo que resta es implementarla físicamente y ajustar los parámetros in situ.

El ingeniero de procesos debe ser capaz de comprender la dinámica del proceso que maneja para poder definir, interactuando con los especialistas en control e instrumentación, el sistema más apropiado para los objetivos planteados. Desde este punto de vista es que abordaremos la conceptualización del modelo de proceso y la simulación de su comportamiento dinámico.

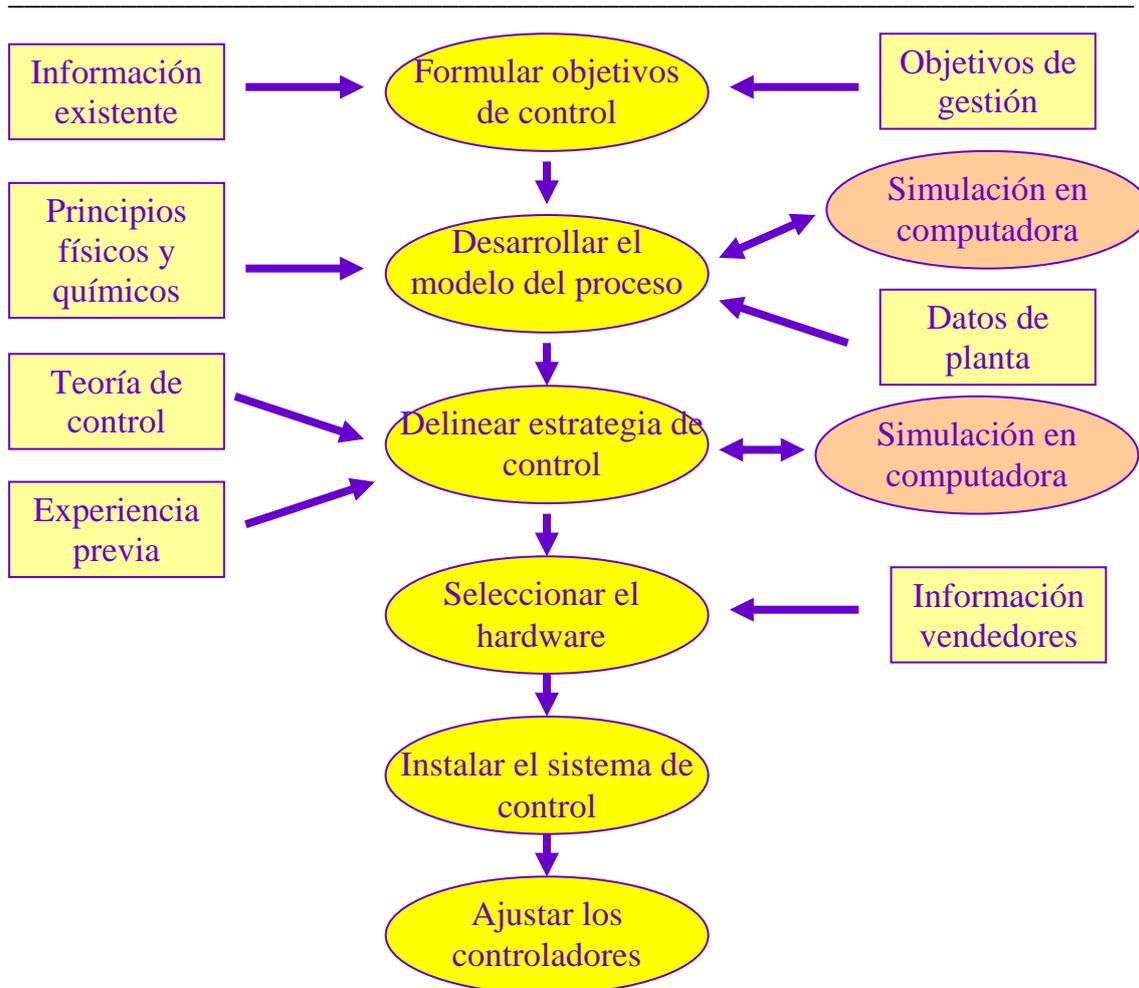


Fig. 1.7 Planteo conceptual para implementar un sistema de control automático.

Modelado de procesos

El ingeniero de procesos debe tomar decisiones acerca de los mismos, ya sea en la etapa del diseño, o en la operación. Y tanto en la etapa de diseño como en la definición de las condiciones de operación se utilizan los principios científicos básicos y las herramientas matemáticas para caracterizar el comportamiento de los procesos, formulando modelos, analizándolos, en lugar de trabajar directamente con el sistema real. Existen factores de costos, de seguridad, etc. que hacen preferible trabajar con modelos previamente a hacerlo con el sistema real.

Si bien existen diversas interpretaciones de la palabra modelo, a nuestros efectos un modelo de proceso es un conjunto de ecuaciones (incluidos los datos necesarios para resolverlas) que permite predecir el comportamiento de un sistema o proceso. Es una abstracción del proceso real y como tal no incorpora absolutamente todas las características o detalles del proceso real, es un reflejo simplificado de la realidad. Por lo tanto, debe buscarse un compromiso entre los detalles que refleja el modelo y el esfuerzo por obtenerlo, en función del uso que se le va a dar.

¿Para qué usar modelos? Puede haber múltiples respuestas a esta pregunta:

- Para comprender el comportamiento del proceso sin necesidad de realizar experimentos.
- Porque el sistema evoluciona muy rápidamente (microsegundos) o por el contrario muy lentamente (ej. sistemas planetarios o geológicos).
- Para predecir futuros problemas de mercado en economía (algo que todavía no sucedió).
- Para resolver problemas de localización (por ejemplo, de una industria antes de instalarla).
- Para síntesis de procesos, diseño de un nuevo proceso.
- Para diseño de equipos.
- Para optimizar las condiciones de proceso, en lugar de hacerlo por ensayo y error.
- Para diseñar estrategias de control, que tengan en cuenta así el comportamiento dinámico del sistema.
- Para entrenamiento de personal (mediante consolas que simulan plantas virtuales, simuladores de vuelo, etc).
- Para realizar análisis de riesgos y problemas de seguridad (p.ej. prevenir explosiones o rupturas mecánicas).
- Para la simulación de problemas ambientales o de salud con los cuales no es viable experimentar técnica ni éticamente.

Hay muchas clasificaciones de modelos. A nuestros efectos distinguiremos modelos

- Basados en principios fundamentales (leyes de conservación de masa y energía, cinética, termodinámica, fenómenos de transporte, ...)
- Empíricos (ajuste a polinomios, p.ej.)
- Intermedios, combinaciones de los anteriores.

Pero también hablaremos de modelos

- Determinísticos, o basados en leyes determinísticas, y
- Estocásticos, basados en leyes de probabilidad.

- Continuos, cuando las variables pueden tomar cualquier valor de los números reales, y
- Discretos, cuando las variables toman valores discretos (no continuos).

- En estado estacionario, cuando no existen variaciones en el tiempo, y
- No estacionarios o dinámicos, cuando sí hay cambios en el tiempo.

- De parámetros concentrados (“lumped parameters”), cuando las variables o parámetros cambian solo en el tiempo pero no en el espacio (ej.: RCAI), y
- De parámetros distribuidos (“distributed parameters”), cuando cambian en el tiempo y también en el espacio (ej.: RTFP).

Hemos utilizado reiteradamente la palabra “sistema” sin mayor definición. Entenderemos por sistema a la parte de la realidad sobre la cual vamos a concentrar nuestra atención, y que está compuesta por componentes (o subsistemas) que interactúan unos con otros de acuerdo a ciertas reglas, dentro de ciertas fronteras. En

general, un sistema puede llegar a realizar funciones que no realizan sus partes constituyentes.

En general en un sistema pueden identificarse:

- Variables de estado (x), conjunto mínimo de variables que permiten caracterizar el estado del sistema, esto es, saber sin dudas en qué condiciones se encuentra.
- Variables de entrada (u , d), que son determinadas por el ambiente que rodea al sistema; pueden ser manipulables (u) o no, y en este último caso se denominan perturbaciones (d , “disturbances”).
- Variables de salida (y), son las variables que son medidas o, en términos de información, que traspasan las fronteras del sistema.
- Parámetros (p), son atributos que fijan las características del diseño.

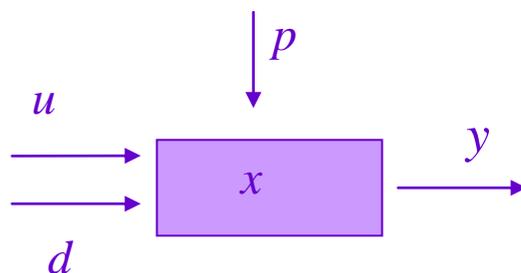


Fig. 1.8 Modo de *análisis*. El proceso está caracterizado por las variables de estado x ; las entradas al mismo pueden ser variables manipuladas u , o perturbaciones d ; y son las salidas del sistema; p los parámetros que fijan el diseño.

En la Figura 1.8 se muestra al proceso en modo de *análisis*: son conocidos los parámetros y las entradas del sistema y se pueden determinar sus salidas. El sentido de las flechas indica hacia donde fluye la información. Tenemos que “darle” al sistema los valores de los parámetros, “recibirá” el efecto de las variables de entrada y “generará” la información de las variables de salida.

Por el contrario, en la Figura 1.9 el sistema es visto en modo de *diseño*: se conocen las entradas, se desea tener determinadas salidas y en función de ello se fijan los valores de los parámetros. Muchas veces es necesario un proceso iterativo para llegar a los valores de parámetros deseados: se parte de algunos valores razonables de esos parámetros y se analizan las respuestas, comparándolas con las respuestas deseadas; si las respuestas son aceptables entonces nos quedamos con los valores de los parámetros que habíamos elegido, de lo contrario proponemos un nuevo conjunto y reiteramos la evaluación hasta que se satisfaga el criterio de aceptación.

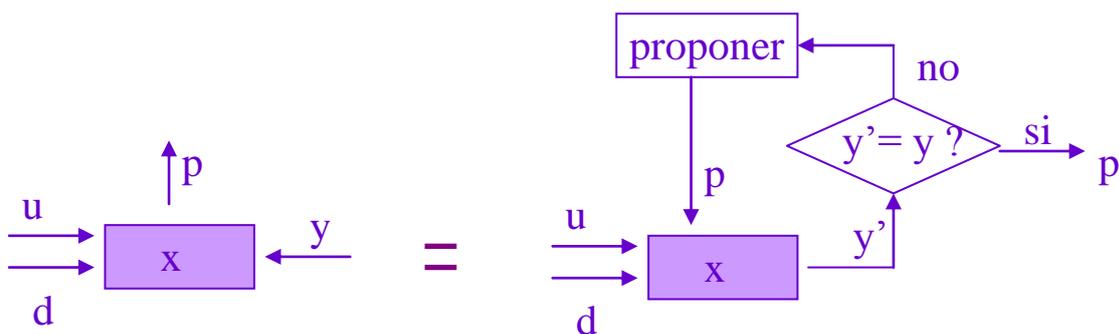


Fig. 1.9 Sistema en modo de *diseño*. La parte derecha de la figura muestra el eventual esquema iterativo que se sigue hasta obtener el conjunto p de parámetros adecuado.

Finalmente en la Figura 1.10 se muestra al proceso en modo de *control*. En este caso, recordemos que se pretende actuar sobre las entradas al sistema para obtener determinada respuesta. Entonces, fijados los parámetros p y la salida deseada y se determina qué valor deben tener las variables de entrada manipulables (u). Las perturbaciones (d), por definición, no pueden ser controladas.

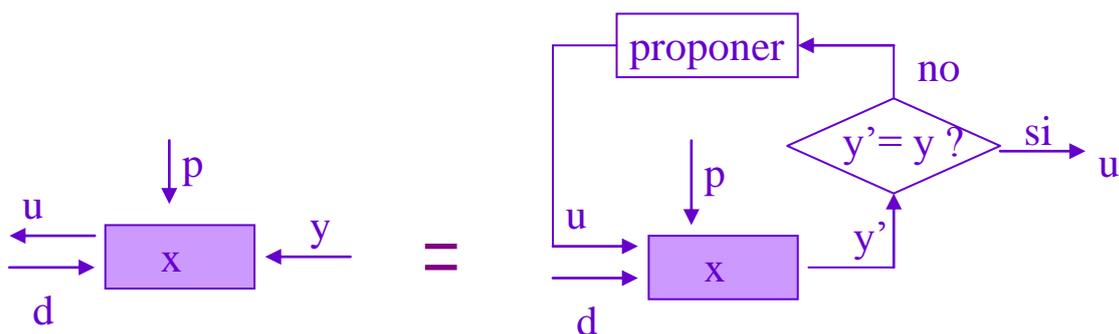


Fig. 1.10 Modo de *control*. El lado derecho de la figura muestra el eventual esquema iterativo que modifica las entradas manipulables del sistema para obtener la salida deseada.

En general la construcción de un modelo es un proceso que involucra varias etapas y que muchas veces es iterativo. Como orientación general podemos señalar los siguientes pasos:

- Definir objetivos: qué información se espera obtener, cuáles son las fronteras, qué grado de exactitud.
- Formular un modelo conceptual: identificar los fenómenos más importantes, realizar un diagrama esquemático, identificar las variables, si dependen unas de otras, si varían en el espacio, restricciones, etc.
- Formular si fuera posible el modelo matemático, sobre la base de las leyes fundamentales (balances, relaciones termodinámicas, estequiométricas, cinéticas, etc).
- Identificar los parámetros del sistema.

- Realizar las simplificaciones que sean posibles, sin dañar los objetivos planteados.
- Analizar la consistencia matemática: grados de libertad, dimensiones, unidades.
- Resolver el modelo: hallar el valor de las variables en el tiempo (y en el espacio) dadas determinadas condiciones; analítica o numéricamente.
- Verificación: que no existan errores en la implementación del modelo o en los métodos numéricos utilizados.
- Validación: en base a datos experimentales, o estudios de sensibilidad.
- Perfeccionamiento.