

CAPITULO 14

La dinámica de los sistemas

Introducción

En los capítulos precedentes hemos desarrollado los aspectos más relevantes de la Teoría General de Sistemas y de los principios del control aplicables a cualquier tipo de sistema. Ahora vamos a introducir una nueva noción que, de una u otra manera, ha estado presente en la mayor parte del desarrollo anterior: la noción de sistema dinámico, en torno a la cual gira la disciplina denominada Dinámica de Sistemas.

Cuando al afrontar el estudio de un sistema una variable relevante es el factor tiempo, es decir, cómo evoluciona el sistema a lo largo de un determinado período de tiempo, prestaremos atención a los elementos dinámicos del sistema. Estaremos interesados en el estudio de la dinámica del sistema.

Esta dinámica es consecuencia, fundamentalmente, de las interacciones entre los elementos del sistema. Las interacciones entre los elementos están configurando, por otro lado, la estructura del sistema. Es por ello que, desde un punto de vista dinámico, todo sistema está siendo determinado por su estructura. Y, en este sentido, uno de los aspectos más destacados por la Dinámica de Sistemas es que las causas de los problemas que aparecen en un sistema social no son tan debidas a sucesos previos como a la propia estructura del sistema (Forrester, 1961, 1968; Aracil, 1983; Martínez y Requena, 1986; Senge, 1990).

Caracterización dinámica de un sistema

En el Capítulo 2, ya vimos que la naturaleza de un sistema está determinada por las partes que lo componen y las interacciones que se establecen entre las mismas. Los elementos que cobran especial importancia a la hora de su estudio dinámico son:

Atributos de los elementos: Magnitudes que representan cualidades perceptibles del sistema. Los atributos permiten realizar una descripción cualitativa del sistema.

Interacciones: Relaciones entre las distintas partes (elementos) del sistema o el entorno, que modifican el valor de los atributos.

Comportamiento: Evolución temporal de los atributos del sistema en una situación particular.

Un ejemplo de estos conceptos puede encontrarse al analizar un sistema de población (ver Figura.-14.1). En él, un conjunto de habitantes se relacionan entre ellos de forma que la población decrece si mueren habitantes y crece si nacen nuevos habitantes. Adicionalmente, los habitantes se relacionan con el

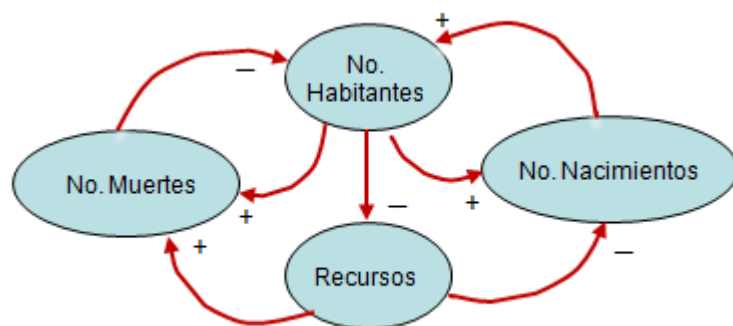


Fig. 14.1 – Sistema de población

exterior (considérese por ejemplo la necesidad que tiene la población de recursos alimentarios). De esta forma, puede considerarse que si hay escasez de alimentos la población disminuirá

(habrá más muertes y menos nacimientos); si, por el contrario, hay abundancia de alimentos la población aumentará (habrá menos muertes y más nacimientos). En este caso, el número de habitantes y los recursos pueden considerarse como atributos del sistema población y las interacciones serán las relaciones que determinan el número de nacimiento y muertes.

Aunque la naturaleza física de los sistemas y las interacciones que los caracterizan son bien diferentes, todos tienen algo en común. Esto es:

Los sistemas responden a una excitación (interacción externa) con un comportamiento o señal de respuesta concreta (evolución de los atributos) que dependerá del estado en que se encuentren las partes del sistema (interacción interna).

A modo de ejemplo la caracterización dinámica de un sistema *automóvil* es la siguiente: Cuando un conductor actúa sobre el acelerador (interacción / entrada), el automóvil (sistema) responde con un cambio de la velocidad (atributo / salida).

Concepto de estado

Desde un punto de vista cualitativo, describir el estado de un sistema consiste en especificar el valor de aquellas magnitudes a partir de las cuales es posible obtener el valor de todos los atributos que caracterizan el sistema. Su conocimiento, junto al de las interacciones externas permite predecir la evolución de los atributos. Por tanto, para comprender el estado de un sistema, cabe recordar las siguientes definiciones:

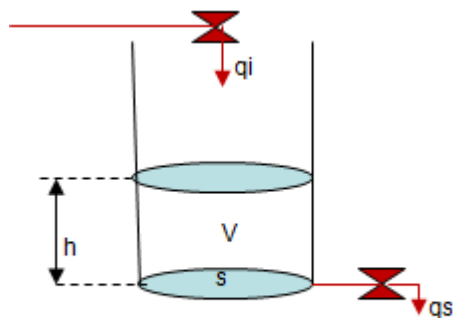
Variables de estado: representan el menor conjunto posible de magnitudes variables en el tiempo que permiten describir el estado (valor de los atributos) de un sistema (Ogata, 1980).

Parámetros: son magnitudes que afectan al valor de los atributos del sistema pero que se mantienen fijas a lo largo del tiempo. Son los responsables de las diferencias entre un sistema u otro.

Variables de entrada: son magnitudes que afectan al valor de los atributos del sistema y que pueden cambiar como consecuencia de una interacción externa.

Variables de salida: son magnitudes cuyo conocimiento interesa especificar y cuyo valor es función de las variables de estado y las variables de entrada. En ocasiones las variables de salida pueden coincidir con las variables de estado.

Veamos un ejemplo (Fig. 14.2) para comprender mejor este concepto: Se trata del sistema de llenado de una cisterna.



h : Altura del fluido
 V : Volumen de fluido
 S : Superficie de la base de la cisterna
 q_i : Caudal de entrada de fluido (m³/hora)
 q_s : Caudal de salida de fluido (m³/hora)

Fig. 14.2 – Sistema de llenado de un depósito

Atributos del sistema:

Volumen de líquido dentro de la cisterna (V)
 Caudal de ingreso (q_i)
 Caudal de salida (q_s)
 Nivel de líquido (h).

Variables de entrada: q_i (se puede alterar abriendo o cerrando el grifo)

Variable de salida: q_s (se puede alterar abriendo o cerrando el grifo)

Variable de estado: h (Depende de los valores de los atributos)

Parámetro: S (Permanece inalterable en el tiempo, la cisterna es siempre la misma)

En el caso de cambiar alguno de los atributos, cambia la variable de estado y por lo tanto tenemos un “comportamiento” distinto. Estos diferentes comportamientos que puede tener el sistema, definen la dinámica del sistema.

En el caso de un sistema que tiene múltiples variables de estado, tenemos el llamado vector de estado.

Dinámica y Comportamiento

Cuando se habla de la dinámica de un sistema se hace referencia al carácter cambiante de las magnitudes (atributos) que permiten describirlo y que en consecuencia originan los cambios de las variables de estado.

Sistema estático y dinámico

Un sistema se llama estático si el valor presente de los atributos depende solamente del valor presente de las interacciones externas. Por el contrario, un sistema se llama dinámico si el valor presente de los atributos depende tanto

del valor actual de las interacciones cómo del valor inicial de dichos atributos o de los valores anteriores de las interacciones. Asumiendo una representación entrada salida, en un sistema estático la salida permanece constante si la entrada no cambia, sólo cambia cuando lo hace la entrada. En un sistema dinámico la salida cambiará en el tiempo, dependiendo de la señal de entrada y del estado del sistema (determinado por las condiciones iniciales); la salida solo permanece constante si el sistema se encuentra en un estado de equilibrio (Ogata, 1987).

Por ejemplo, un cuerpo bajo la acción de la gravedad (entrada del sistema) puede tener distintos comportamientos dependiendo de si la velocidad inicial es positiva, si se deja caer (velocidad inicial nula) o si se suelta estando apoyado sobre el suelo (estado de equilibrio); se trata pues de un sistema dinámico. Por otra parte, la salida de un decodificador dependerá sólo del código introducido a la entrada; por tanto puede considerarse un sistema estático.

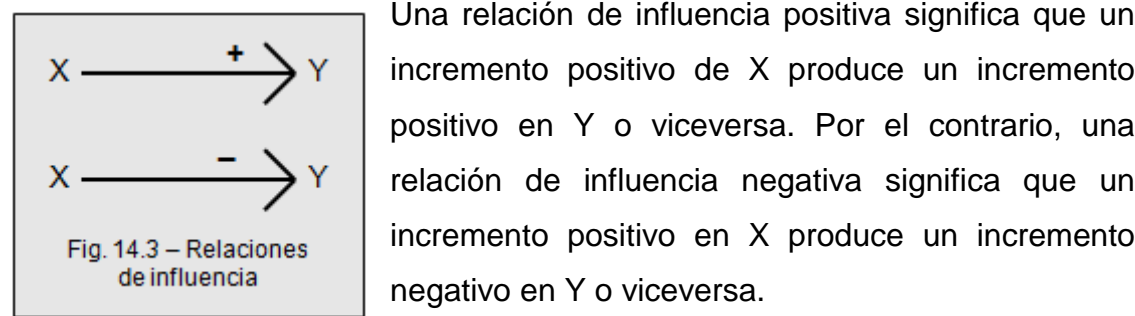
En definitiva, los sistemas dinámicos se caracterizan porque pueden presentar distintos comportamientos según sean las circunstancias en que se producen las interacciones. Por tanto, interesa establecer tanto cuantitativamente como cualitativamente el modo en que cambian los atributos.

En muchos casos, es posible explicar el comportamiento de los sistemas a partir de la estructura que presentan las interacciones que los caracterizan, independientemente de la naturaleza de los mismos. Esto quiere decir que sistemas de distinta naturaleza pueden presentar comportamientos similares. A veces se habla de sistemas isomorfos (Falcón, 1999), tal cual lo hemos expresado al estudiar la TGS en los capítulos anteriores.

Los diagramas causales

Un diagrama causal es un esquema que modela las relaciones de influencia e interacciones que se establecen entre las partes del sistema. Estos diagramas permiten realizar un esbozo de la estructura del sistema. Para realizar estos diagramas se identifican los distintos elementos que componen el sistema y se les asocian atributos; posteriormente se identifican las relaciones que se establecen entre ellos. Las relaciones de influencia se establecen mediante

enunciados de la forma: el atributo X influye positiva / negativamente sobre el atributo Y (ver Figura.-14.3).



En la figura Figura.-14.4 se representan de forma esquemática los efectos de estas relaciones. Las flechas hacia arriba representan un incremento positivo y

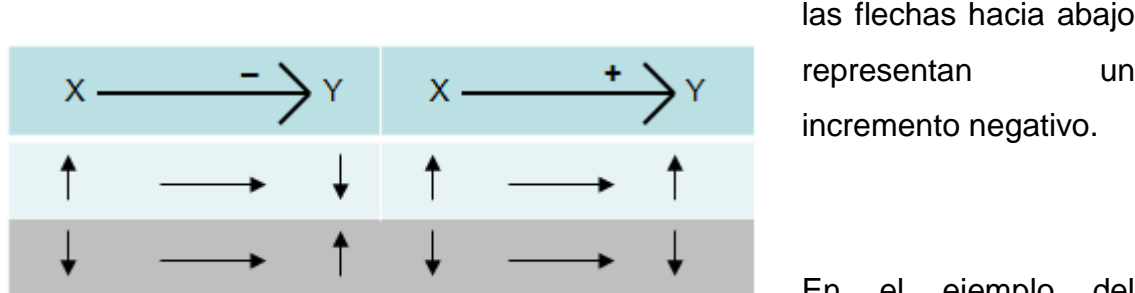
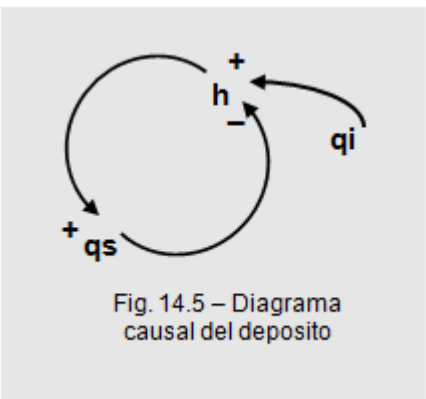


Fig.14.4. - Efectos debido a la relación de influencia

En el ejemplo del depósito de la Fig. 14.2, se identificaron



como atributos el nivel del líquido (h) y el flujo de líquido que circula por la tubería de salida (qs). El flujo de líquido que entra en el depósito (qi) puede considerarse como interacción externa. Como consecuencia, el esquema casual que se obtiene es el que se presenta en la figura 14.5.

Elementos centrales de la dinámica de sistemas

Lazos de realimentación

Las personas tendemos a pensar en función de relaciones causa-efecto unidireccionales, olvidando otro tipo de relaciones más complejas tal y como nos han mostrado numerosos estudios y experimentaciones (e.g.- Hall, 1976, 1989; Kleinmuntz, 1985; Sterman, 1989a, 1989b; Brehmer, 1989). De ahí que el concepto de feed-back o realimentación de la cibernética haya supuesto una pequeña revolución que ha estremecido nuestra concepción más clásica de la causalidad. Se dice que hay una estructura de realimentación cuando la respuesta del sistema afecta a la acción que se aplica sobre el mismo, ver la Fig. 14.6. Una estructura de realimentación puede considerarse como una transmisión circular de la información. Esta estructura circular aparece en

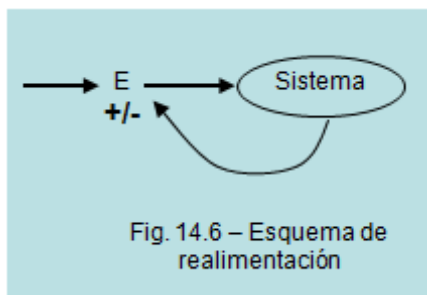


Fig. 14.6 – Esquema de realimentación

múltiples situaciones y es el origen de comportamientos complejos. Este tema de la realimentación ya lo hemos considerado en el Capítulo 2,

Un ejemplo. En un acto tan sencillo y cotidiano como llenar un vaso de agua, solemos expresarnos con palabras como “yo hago que el nivel del agua se eleve hasta donde deseo”. En lenguaje de corte más causal: yo causo la elevación del nivel del agua (efecto). La cibernética viene a enfatizarnos que tal hecho es más

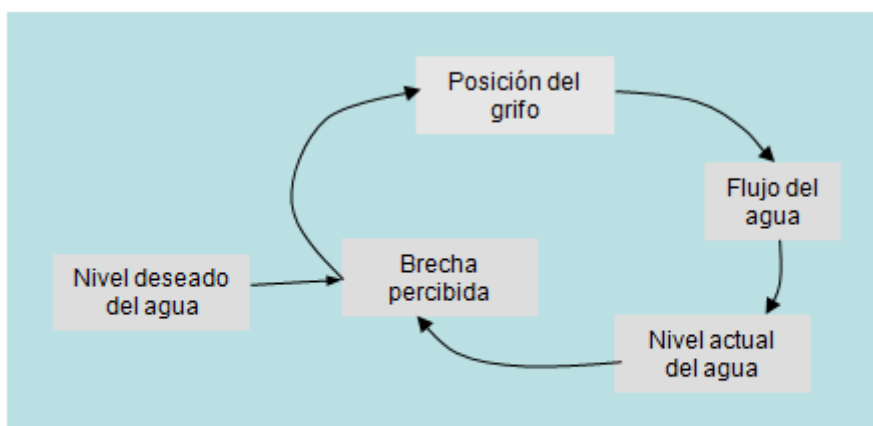


Fig. 14.7- El acto de llenar un vaso de agua desde una visión cibernética, en la que se enfatiza la importancia del feed-back o realimentación. Las flechas expresan relaciones de influencia.

complejo, algo parecido a lo siguiente: “mi propósito de llenar un vaso de agua crea un sistema que causa que el agua fluya cuando el nivel

está bajo y luego cierre el grifo cuando el vaso está lleno” (Senge, 1990). Expresado en un diagrama sería tal y como aparece en la Figura 14.7. Vemos que nuestra descripción habitual causa-efecto, contempla la parte derecha del diagrama, desde “posición del grifo” hasta “nivel actual del agua”. Descripción que, ahora comprobamos, es parcial.

Centrados en la importancia de los lazos de realimentación, vamos a distinguir entre lazos de realimentación negativos y lazos de realimentación positivos, distinción clásica dentro de la Dinámica de Sistemas y la Cibernética (Forrester, 1961, 1968; Maruyama, 1963; Aracil, 1983; Martínez y Requena, 1986; Briggs y Peat, 1989; Senge, 1990).

Un ejemplo muy conocido de lazo de realimentación negativo lo encontramos en el termostato. Programamos la calefacción de nuestro salón para que la temperatura se mantenga a 18 °C y el termostato que contiene este aparato hace que la estufa funcione más o menos intensamente para alcanzar este

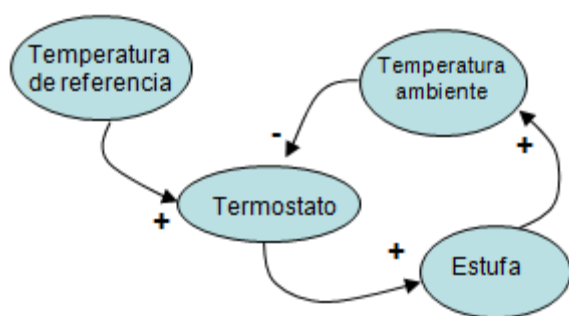


Fig. 14.8 – Sistema de regulación de temperatura.
Ejemplo de lazo de realimentación negativa

valor. Cuando la temperatura baja de los 18° el termostato enciende la estufa para que caliente el salón y, cuando la temperatura supera los 18°, el termostato apaga la estufa. La acción del termostato afecta la estufa, pero también la acción de la estufa afecta al termostato.

En términos dinámicos diríamos que un lazo de realimentación negativo hace que la variación en un elemento se transmite a lo largo del lazo de tal forma que determina una variación de signo contrario en ese mismo elemento, es decir, cualquier variación que se produzca en uno de los elementos del bucle tiende a anularse.

De otra forma, los lazos de realimentación negativos tienden a estabilizar al sistema, a mantenerlo en un valor, serie de valores o un estado determinado. En una meta u objetivo. Por ello son mecanismos de realimentación compensadores, de contención de las desviaciones.

Pero no todos los lazos de realimentación son negativos. También existen lazos de realimentación en los que, en lugar de amortiguar los efectos, éstos se amplifican y, que han servido a Maruyama (1963) para hablar de una segunda cibernética. Los lazos de realimentación positivos actúan de tal modo que la variación de un elemento inicial se propaga a lo largo del lazo reforzándola. Como lazo de realimentación positiva presentamos como ejemplo el sistema de incremento de ventas (Fig. 14.9) de un producto que satisface las expectativas del mercado. Considérese como ejemplo, la venta de un producto que satisface positivamente las expectativas de los clientes. Dicha satisfacción es causa de los comentarios positivos acerca del producto lo que produce un aumento de demanda que, a su vez, genera la producción de un mayor número de unidades del producto, lo que creará un mayor número de clientes satisfechos etc... Los lazos de realimentación positiva están asociados a gráficos causales donde el número de influencias negativas es cero o par.. Los bucles de realimentación positivos representan un “efecto bola de nieve”, un círculo virtuoso.

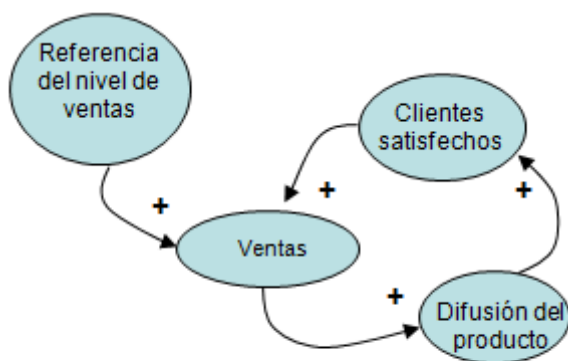


Fig. 14.9 – Sistema de ventas. Ejemplo de lazo de realimentación positiva

En términos dinámicos, un lazo de realimentación positiva representa la variación de un elemento que se propaga a lo largo del lazo y que refuerza la variación inicial haciéndola mayor. Por ello, los bucles de realimentación positivos tienden a no mantener el equilibrio, al contrario, transportan al sistema

hacia nuevos estados. Son mecanismos de realimentación reforzadora, de amplificación de las desviaciones. De otro lado, los lazos de realimentación positiva suponen una nueva revisión del concepto de causalidad en tanto que no siempre causas similares producirán efectos similares debido a la posibilidad de amplificación de los efectos (Maruyama, 1963).

Lo más interesante, para la Dinámica de Sistemas, de los diferentes tipos de lazos de realimentación es su combinación en el modelado de sistemas. Así,

sabremos que lazos de realimentación positivos amplían los efectos, mientras que los lazos de realimentación negativos los amortiguan o estabilizan.

En el diagrama de la Fig. 14.1, representativo de la evolución de la población de una especie, la relación entre “población” y “número de nacimientos” genera un bucle de realimentación positiva, un bucle de amplificación. A mayor población, mayor número de nacimientos, y una nueva mayor población, y un mayor número de nacimientos, y así sucesivamente. Mientras que el bucle “población”, “comida”, “tasa de nacimientos” y “número de nacimientos” es un bucle de realimentación negativa ya que contiene una relación de carácter negativo entre población y comida.

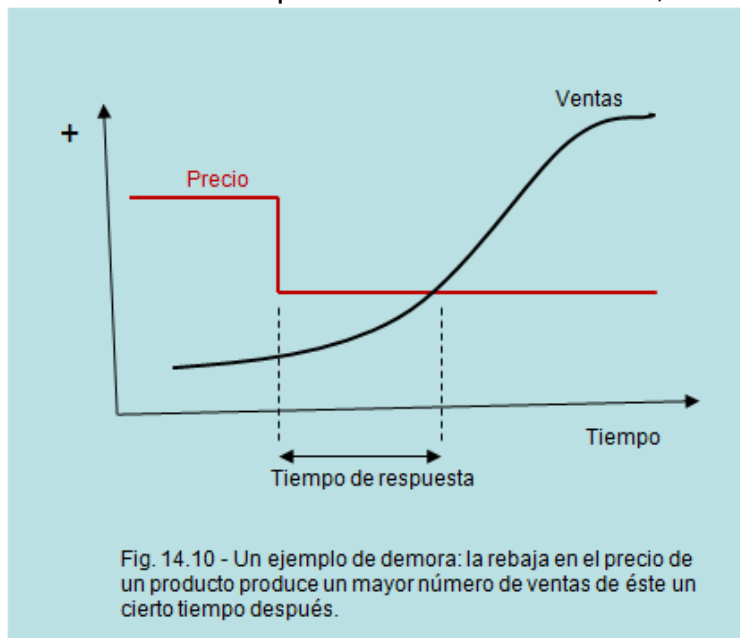
De manera genérica, podemos establecer que cuando en un bucle hay un número par de relaciones de influencia negativas, dicho bucle es de carácter amplificador. Es un lazo de realimentación positiva. Por el contrario, cuando el número de relaciones de influencias negativas es impar, el bucle es de disminución de las amplificaciones. Es un bucle de realimentación negativa. Por otro lado, el carácter global del sistema, amplificador o estabilizador, tendiente al desarrollo o a la estabilidad, dependerá de la fuerza (Maruyama, 1963) o dominación de uno sobre otros (Aracil, 1983) de los diferentes lazos de realimentación. Weick (1969) ofrece una serie de guías, más detalladas, para determinar el carácter global del sistema. Así, la primera de ellas sería que el carácter del sistema viene determinado por el lazo que mayor número de elementos contiene. Si este lazo es reforzador, el sistema será de carácter de amplificación de las desviaciones; si éste es estabilizador, el sistema será de carácter de contención de las desviaciones. Si esta regla no es aplicable, por ejemplo, por igual número de elementos en bucles de distinto tipo, aplicaremos una segunda regla. El carácter del sistema vendrá dado por la predominancia de lazos positivos o negativos, es decir, por la predominancia, en número, de un tipo de lazos. Una tercera regla a aplicar en detrimento de las dos precedentes consiste en contar el número total de relaciones negativas entre todos los elementos del sistema, contando cada relación negativa cada vez que aparezca dentro de un lazo. Si este número total resulta impar, el sistema será de tipo estabilizador, que contrarresta las desviaciones, si el número es par, el sistema será de tipo reforzador, que amplifica las desviaciones. Aplicando estas guías al ejemplo de la Fig. 14.1, basta con tener en cuenta la primera de

las reglas: el sistema es de carácter estabilizador en tanto al mayor número de elementos que implica el lazo negativo (cuatro en total) frente a los elementos implicados en el lazo positivo (dos).

Demoras en los flujos de realimentación

Junto al interés por los lazos de realimentación, bien positivos bien negativos, la Dinámica de Sistemas enfatiza la importancia de los rezagos y los retrasos en las transmisiones (de información, de material, etcétera). Es decir, al construir un modelo mediante diagramas causales, éste debe también tener en cuenta que la relación de influencia que une dos elementos puede precisar del transcurso de un cierto período de tiempo.

Por ejemplo, las decisiones de rebajar un producto (Fig. 14.10) no suelen tener un efecto inmediato en el número de ventas del mismo, sino que se requiere de un cierto período de tiempo para comprobar estos efectos (tiempo de respuesta, rezago mas retraso). Otro ejemplo, entre la realización de un pedido a planta de fabricación y su recepción para su puesta a la venta suele transcurrir un tiempo. En este último caso, Forrester supo ver como las



demoras producidas en los sistemas de distribución industriales provocaban oscilaciones en los pedidos (Forrester, 1961), de ahí que, desde un punto de vista gerencial, un mayor control de los retrasos y los rezagos conduce a un mayor control en el sistema.

Dinámica de sistemas y sistemas de control

Un sistema de control automático es un mecanismo que permite actuar sobre un sistema con el fin de que los atributos o alguno de los atributos del mismo alcancen un valor determinado o presenten una evolución temporal concreta. Los atributos que se desea controlar son las salidas del sistema. Las actuaciones de control representan las entradas del sistema a controlar.

Los sistemas de control, como vimos en el Capítulo 2, pueden funcionar de dos formas distintas, en lazo abierto o bien en lazo cerrado. Esta particular división entre sistemas se debe a como se realiza la acción de control.

Como ya vimos, un sistema de control en lazo abierto es aquel en el cual la acción de control, con frecuencia obtenida previamente a la aplicación de la acción de control, es independiente de la salida. El bloque de control actúa sobre el sistema de acuerdo a unos objetivos previamente establecidos. Los sistemas de control en lazo abierto tienen un claro inconveniente: la aparición de perturbaciones puede alejar al sistema del comportamiento deseado, sin que el sistema de control reaccione al cambio experimentado por el sistema.

Para evitar este inconveniente, se utilizan los sistemas de control en lazo cerrado. En ellos, el controlador considera la salida, modificando la acción a realizar sobre el sistema en función de lo alejada que ésta se encuentre del valor de referencia deseado. Los sistemas que funcionan en lazo cerrado se denominan comúnmente como sistemas realimentados.

Según lo expuesto en los puntos anteriores de este Capítulo y en el Capítulo 2, los sistemas de control en lazo cerrado son sistemas que presentan estructura de realimentación, y como tales podrán ser analizados utilizando las herramientas propias de la dinámica de sistemas.

Conclusiones

El componente principal de la formación impartida en los cursos de análisis y diseño de sistemas, apunta en general a la conceptualización de procesos en estado estacionario, a los efectos de encarar el dimensionamiento de los mismos. Normalmente no hay oportunidad para profundizar en aspectos que involucren la dinámica de los sistemas. Se plantea en este libro complementar

la formación con una introducción al estudio de procesos en transición a partir de la conceptualización de los fenómenos involucrados, la formulación de modelos sencillos que tengan en cuenta dicha conceptualización, y eventualmente la simulación del comportamiento de dichos procesos con herramientas sencillas de base computacional.

Asociado al conocimiento de la dinámica del sistema se plantea la necesidad de definir el control del mismo. Es en ese contexto en el que se introducen los lazos más sencillos de control y se evalúa el efecto de los mismos sobre las variables del proceso. Sin perjuicio de profundizar en instancias posteriores, se apunta a brindar al observador una base mínima que le permita interactuar con otros profesionales en el área de control e instrumentación en base a las necesidades planteadas desde el proceso.

Se pretende que el observador frente a un caso relativamente sencillo pueda formular un modelo que represente satisfactoriamente las características del sistema, y pueda evaluar su comportamiento dinámico, incluyendo los lazos de control.

.