

ESTRUCTURA Y COMPORTAMIENTO EN TEORÍA DE SISTEMAS

Javier ARACIL

ABSTRACT

New results have been obtained by dynamical systems theory which allow an amendment of the narrow vision of mechanicism. Forms of behavior richer than the ones considered by classical mechanicism can be exhibited by the new structures studied by system theory (feedback, reaction-diffusion, hierarchical structures, multiple time-scales...). In this paper a critical presentation of these ideas is developed.

1.- Introducción

Al abordar la discusión de cuestiones relacionadas con la teoría de sistemas, surge inmediatamente la necesidad de precisar a qué nos referimos cuando hablamos de un sistema. Este término, en el lenguaje ordinario, tiene múltiples acepciones. Algunas hay que descartarlas sin más, a los efectos que aquí interesan. Por ejemplo, cuando se habla de sistema como sinónimo de modo o manera de hacer algo (como cuando decimos: tengo un sistema para resolver tal problema).

En teoría de sistemas se habla de un sistema como de una entidad compleja que resulta de la adecuada integración de sus partes en la unidad sustantiva que es el propio sistema. Un sistema es una entidad -algo que tiene sentido en sí- que, sin embargo, es susceptible de ser analizada -diseccionada- en partes. Estas, aunque consideradas aisladamente pueden poseer su propia sustantividad, aquí no interesan más que en la medida que se articulan en la unidad de orden superior que es el sistema. Estamos, por tanto, ante la inagotable dialéctica entre el todo y las partes. Históricamente tiene sus orígenes en la metáfora de Platón, según la cual el carro -el todo, el sistema- es algo más que -algo distinto de- la suma de sus partes. Sin embargo, no falta quien diga que esta alusión a "algo más" es intangible y que el carro se 'redu-

ce' a -se puede construir a partir de- sus partes. Son los llamados reduccionistas. En el otro extremo se encuentran los holistas, para los que lo que de verdad existe -interesa- son los sistemas en tanto que entidades- todos. Entre estos dos extremos se define una postura ecléctica para la que, recurriendo a su clásica y precoz formulación por Pascal, se tiene "*por imposible conocer las partes sin conocer el todo, así como conocer el todo sin conocer particularmente las partes*" (Pascal 81). Es la postura del sistemista, que es la que adoptaremos aquí (Bunge 79, Aracil 86b).

Abordar en toda su generalidad cuestiones relacionadas con sistemas es una pretensión que roza la utopía intelectual. Sin embargo, si hacemos unas cuantas restricciones a la clase de sistemas de las que nos vamos a ocupar, es posible llegar a establecer conceptos de amplio interés y aplicabilidad. En primer lugar, vamos a ocuparnos de sistemas concretos formados por partes tales que su comportamiento se manifiesta mediante "características empíricas", a las que es posible asociar magnitudes. De ese modo, a un sistema σ podemos asociar un conjunto de magnitudes x que representan los diferentes atributos que caracterizan las partes del sistema en cuestión. Estas magnitudes x serán observables o medibles. Respecto a esta mensurabilidad adoptaremos una perspectiva muy amplia que incluya la posibilidad de asignación subjetiva del valor correspondiente.

Puesto que las partes están vinculadas entre sí, para articularse en el sistema, las magnitudes a ellas asociadas estarán ligadas por relaciones de influencia. Estas relaciones expresan las acciones entre las partes del sistema. Mediante estas acciones mutuas el comportamiento del sistema adquiere su unidad.

Analicemos con un poco de detalle estas relaciones de influencia. Supongamos que A y B representan sendas partes de un sistema. A la parte A se asocia, al menos, una magnitud, por ejemplo la x_1 , y análogamente, a la B la x_2 . El hecho de que A influya sobre B se manifestará en que los valores tomados por x_2 estarán influidos por los de x_1 ; es decir, variaciones de los valores de x_1 darán lugar a cambios en los de x_2 . En tal caso diremos que A actúa (influye) sobre B , y escribiremos, siguiendo la sugerencia de Bunge (Bunge 77), $A > B$, lo que se lee ' A influye sobre B '. Esta influencia, en el mejor de los casos, que es el que nos interesa aquí, será susceptible de una expresión formal tal

ESTRUCTURA Y COMPORTAMIENTO EN TEORIA DE SISTEMAS

como $x_2 = f(x_1)$, lo que significa que el valor tomado por x_2 está determinado -es función- del tomado por x_1 .

Supongamos ahora que el sistema está formado por un conjunto finito de partes $[A, B, \dots, \mathcal{E}]$. Este conjunto se denomina, de acuerdo con Bunge (Bunge 79), composición del sistema. Entre estas partes se ejercerán relaciones de influencia. Dada la naturaleza de estas relaciones, es claro que se puede construir un grafo orientado tal que sus vértices o nudos sean las partes del sistema, y sus arcos (las aristas orientadas) representen la relación de influencia que vincula los nudos correspondientes. En la figura 1 se tiene un grafo de este tipo. Este grafo suministra una representación gráfica de como las partes se articulan en el sistema. Esta red de relaciones da lugar a lo que se conoce como estructura del sistema.

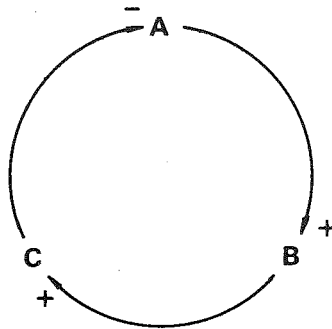


figura 1

Estructura de un sistema como trama de relaciones entre los elementos que lo componen.

El grafo suministra solamente un esbozo de cómo se produce la vertebración del sistema. Si además del grafo, se formaliza la relación entre las magnitudes asociadas a las partes del sistema mediante expresiones matemáticas como las indicadas más arriba, entonces es posible construir objetos matemáticos que constituyen réplicas fidedignas de los aspectos cuantitativos de un sistema concreto: se trata de los modelos matemáticos. Estos son, en principio, objetos abstractos. Pero si son programados en un computador, entonces se obtiene en estos últimos un modelo físico del sistema en cuestión, con lo cual se puede proceder a algo análogo a una experimentación. Este es un recurso de gran importancia para el sistemista en el estudio de sistemas.

2.- Comportamiento dinámico de un sistema

Una cualidad de gran interés de un sistema es su comportamiento; es decir, como se desenvuelve en determinadas situaciones. Se entiende desenvolvimiento a lo largo del tiempo, por lo que interesará considerar la dependencia del tiempo de las distintas magnitudes x_i asociadas al sistema. Esta dependencia se expresa mediante funciones $x_i(t)$. Estas funciones representan lo que se conoce como trayectoria de cada magnitud x_i . El conjunto de las trayectorias $[x_i(t)]$ describe su evolución durante un cierto período de tiempo, por lo que no es abusivo el decir que constituye la historia del sistema durante ese período. Bien entendido, del sistema considerado bajo la perspectiva que aquí se adopta, que se limita a considerar sus aspectos susceptibles de que se les asocie una magnitud.

Esta perspectiva tiene los mismos orígenes que la ciencia moderna. El empleo de trayectorias para la caracterización del comportamiento de un determinado objeto, se inicia en los estudios de Kepler y Galileo sobre el movimiento de los astros, o de los proyectiles, que dieron origen a la mecánica teórica. En el modelado matemático de esos problemas está el origen de la teoría de las ecuaciones diferenciales, que aportan los útiles matemáticos para el estudio de los sistemas dinámicos. Bajo este punto de vista la trayectoria es el objeto básico de estudio. Por una parte, del comportamiento real del objeto estudiado se registran sus trayectorias -posiciones referidas al instante en que se producen-. Por otra, mediante el modelado matemático se pretende generar artificialmente esas mismas trayectorias. La trayectoria suministra, por tanto, el gozne entre lo experimental y lo teórico. La concepción última de la realidad como un haz infinito de trayectorias constituye la peculiar forma de ver la realidad de la mecánica teórica.

Este enfoque se extiende en tiempos más modernos a otras ramas de la ciencia y de la técnica. Especialmente los ingenieros eléctricos, y muy en particular los especialistas en tratamientos de información y en control automático, acostumbran a ver las señales que manejan de forma análoga a como ven los mecánicos las trayectorias: magnitudes que evolucionan en el tiempo y que son, por tanto, susceptibles de ser representadas matemáticamente mediante funciones de la forma $x(t)$, que admiten genéricamente una imagen gráfica como la de la figura 2. Además, la instrumentalización electrónica permite 'ver' el comportamiento de una

ESTRUCTURA Y COMPORTAMIENTO EN TEORÍA DE SISTEMAS

señal en la pantalla de un osciloscopio, o mediante un registrador gráfico. Esta posibilidad de manejarse experimentalmente con comportamientos de sistemas determinará el desarrollo de conceptos llamados a tener gran importancia en el desarrollo de la teoría de sistemas. Permite concebir una *geometría del comportamiento* con una base experimental. Los sistemas con los que experimentan los mecánicos son en realidad muy sencillos -bolas y resortes, en número pequeño. Sin embargo, los sistemas eléctricos pueden alcanzar una notable complejidad, en la medida que el número de partes componentes puede crecer en forma desmedida. No hace falta mencionar la prodigiosa máquina electrónica que es el computador para mostrar el grado de complejidad que puede alcanzar un sistema electrónico.

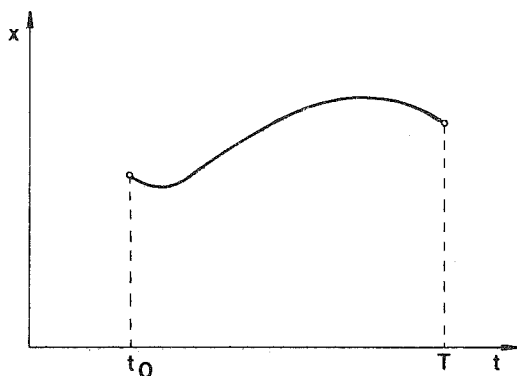


Figura 2
Trayectoria de una magnitud x asociada a un sistema.

Otros campos del saber adoptaron pronto esta forma de ver la realidad. Prácticamente todos aquellos en lo que es significativo representar sus objetos de estudio mediante conjuntos de magnitudes que evolucionan en el tiempo. Así, por ejemplo, en economía se estudia la evolución del valor tomado por determinadas magnitudes económicas -ahorro, producción...-; la trayectoria de esas magnitudes diríamos aquí. Lo mismo sucede con otras ramas de las ciencias biológicas (ecología), sociales y humanas.

Esta caracterización de la realidad mediante trayectorias conduce al concepto de *sistema dinámico* y está en la base de la teoría de sistemas tal como la consideramos aquí. Sin embargo, no faltan voces que

claman por una superación de la teoría de sistemas de las trayectorias mediante una concepción más amplia del comportamiento de los sistemas. Estamos pensando especialmente en las derivaciones de la termodinámica de los procesos irreversibles que han permitido una crítica y una superación de la descripción del comportamiento de un sistema mediante sus trayectorias (Prigogine 83). Sobre estas cuestiones volveremos más adelante. También conviene aludir aquí a los trabajos de Robert Rosen (Rosen 85a y 85b) en los que trata de superar las limitaciones inherentes al mecanicismo de los sistemas dinámicos -determinación unívoca del estado- mediante una clase más amplia de formalismos matemáticos. Aquí sólo queremos dejar constancia de lo sugestivo de esa vía, que en la actualidad se encuentra en fase incipiente.

Por el momento volvamos a la concepción clásica del comportamiento de un sistema como el conjunto de las trayectorias $x(t)$ que se le pueden asociar. Este conjunto de trayectorias constituye una descripción de *qué* hace el sistema, de cuál es su comportamiento. Sin embargo, si pretendemos profundizar en su conocimiento es lógico que nos cuestionemos *cómo* lo hace; que busquemos una explicación a ese comportamiento. El conjunto de trayectorias da cuenta del comportamiento, lo narra. Esto es insatisfactorio, en el sentido de insuficiente. Interesa *dar razón* de él. Pero, ¿cómo podemos dar razón del comportamiento de un sistema? Postulando para él un 'mecanismo' que permita generar ese comportamiento. En el mejor de los casos -el que aquí nos interesa- ese mecanismo será expresable formalmente, mediante expresiones matemáticas, con las cuales la generación de las trayectorias se reduce a un simple problema de cálculo. De ese modo, dar razón del comportamiento de un sistema significa desenmarañar la trama de relaciones causales que permitan explicarlo. Para nosotros esa explicación es clara. Se reduce a que la trama de relaciones que articulan al sistema suministre un 'mecanismo' con el que construir un modelo (matemático) de sistema real estudiado que genere unas trayectorias que sean una réplica fiel de las observadas en el sistema real. Este modelo, al ser capaz de generar las trayectorias del sistema, y ser explícito en cuanto a los mecanismos que las generan, permite, en cierto sentido, dar razón de su comportamiento.

3.- Estructura y comportamiento de un sistema

Estamos viendo, aún quizás de forma imperceptible, cómo se ligan estructura y comportamiento. Por una parte, la estructura del sistema establece cómo se articulan sus partes en la entidad que es el propio sistema. Viene representada por la trama de influencias entre estas partes. Suministra la urdimbre, la argamasa mediante la que las partes se integran en una unidad. Por otra, estas influencias entre las partes codeterminan su comportamiento. Una parte de un sistema, considerada aisladamente, no tendrá la misma trayectoria que si se integra en el sistema (del mismo modo que un planeta no tendría la misma trayectoria si se aislase del sistema solar). De este modo el comportamiento de las partes del sistema, una vez articuladas en él, está determinado por la misma red de relaciones que constituye la estructura del sistema. Estructura -trama de relaciones- y comportamiento -trayectorias del sistema- constituyen las dos caras de una misma realidad.

Avancemos un poco más en la formalización del proceso que estamos describiendo. Si las relaciones entre magnitudes asociadas a las partes del sistema son susceptibles de expresión matemática, entonces reuniendo todas estas expresiones es posible llegar a obtener un objeto matemático de la forma:

$$\frac{dx}{dt} = f(x) \quad (1)$$

que expresa cómo varían con el tiempo cada una de las distintas magnitudes x_i en función de los valores formados por todas ellas. Este objeto matemático recibe la denominación de sistema dinámico.

Para su obtención, en cada caso, se recurre a técnicas adecuadas, que dependen fundamentalmente del ámbito al que pertenezca el sistema concreto del que la anterior expresión constituye un modelo matemático. Si ese sistema pertenece al mundo inanimado entonces las ciencias físicas suministran normalmente las leyes que regulan las interacciones elementales en el seno del sistema. Estas leyes suministran las expresiones matemáticas que debidamente organizadas conducen a una expresión como la anterior (1). Por ejemplo, para sistemas concretos mecánicos o eléctricos, la obtención de modelos de la forma (1) es un ejercicio aparentemente

te sencillo. Puede suceder que el sistema concreto que se trata de modelar pertenezca a otros dominios del conocimiento en los que se carece de leyes universalmente aceptadas que regulen las interacciones entre las partes del sistema. Sin embargo, aún en ese caso se dispone de técnicas de modelado, como la denominada dinámica de sistemas que permiten construir un sistema dinámico de la forma anterior (1). Esta técnica suministra los útiles conceptuales y operativos para pasar de un modelo verbal, expresado en lenguaje ordinario, a un diagrama de influencias, como el de la figura 1, y de él a un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden, como el de la expresión de (1). El detalle de esta técnica puede verse en obras especializadas (Aracil 86a), pero lo que aquí conviene retener es que aún en campos ajenos a las ciencias físicas es posible obtener modelos matemáticos de la forma (1) como resultado de un análisis de la estructura del sistema en cuestión.

El conjunto de operaciones mediante las cuales se construye un modelo matemático de un sistema concreto recibe la denominación de proceso de modelado. Este proceso comprende tanto el análisis -disección- del sistema en cuestión, como el estudio de cómo se vinculan las partes entre sí -integración- para restituirle su unidad. Aquí nos interesa la consideración del proceso de modelado del comportamiento. En ese caso de lo que se trata es de conseguir que el modelo reproduzca el comportamiento del sistema original.

El comportamiento del modelo se obtiene integrando las ecuaciones (1). Esta integración se puede hacer de muchas formas, pero la más general y operativamente la más empleada, consiste en programar las ecuaciones (1) en un computador. De este modo la máquina permite obtener un conjunto de trayectorias $x(t)$, que satisfacen las ecuaciones (1), una vez fijadas unas condiciones iniciales $x(0)$. Si estas trayectorias $x(t)$ reproducen con aceptable fidelidad las $x(t)$ del sistema original, entonces diremos que las ecuaciones (1) constituyen un razonable modelo del comportamiento de ese sistema -de manera análoga a como decimos que una determinada maqueta, que reproduce aceptablemente bien las relaciones espaciales y volumétricas de un edificio, es un razonable modelo de éste. En el caso de la maqueta de un edificio lo que el modelo pretende reproducir son las relaciones geométricas, mientras que nuestro modelo lo que intenta representar es la evolución a lo largo del tiempo de las magnitudes consideradas relevantes del objeto concreto. Pero en

ambos casos de lo que se trata es de representar mediante un objeto artificial -el modelo- aquellos aspectos de un objeto concreto relevantes para el estudio en cuestión.

El modelo matemático, que es un objeto abstracto, puede programarse en un computador, permitiendo, con ello, tener en esta última máquina una réplica del sistema original. Esta réplica está relacionada con el sistema original únicamente por lo que respecta a las trayectorias que genera. Con ella se puede experimentar exhaustivamente respecto a los modos de comportamiento del sistema estudiado -mejor dicho, respecto a los modos de comportamiento que genera la estructura que sirve de base al modelo. Se dice a veces que un modelo de esta naturaleza es un modelo de simulación, ya que es capaz de simular o imitar el comportamiento del sistema original. Su empleo está ya muy extendido en diversas ramas de la técnica, puesto que con ellos se puede estudiar el comportamiento de determinados artefactos, que se proyecta construir aún antes de llevar a efecto esa construcción.

4.- La estructura condiciona el comportamiento

Llegados a este punto conviene hacer una pequeña recapitulación. Por una parte, hemos empezado diciendo que para nosotros un sistema era una entidad formada por partes trabadas entre sí mediante relaciones de influencia. Hemos visto cómo esta trama de influencias podría ser representada por un grafo, que suministra una imagen gráfica de lo que hemos llamado la estructura del sistema. Por otra parte, hemos dicho que nuestro principal objeto de estudio era el comportamiento del sistema, entendiéndolo por ello la evolución a lo largo del tiempo de las magnitudes consideradas relevantes del sistema en cuestión. Esta evolución se representa mediante las trayectorias de estas magnitudes.

De este modo para nosotros los conceptos de estructura y comportamiento quedan establecidos con claridad. Es más, podemos, incluso, asociarles una representación gráfica: es lo que se hace en las figuras 1 y 2. Hemos mencionado también cómo es posible pasar de un concepto al otro. Cómo, mediante técnicas adecuadas, es posible obtener a partir de una estructura de relaciones un modelo matemático que genere las trayectorias -el comportamiento- del sistema. De este modo estructura y comportamiento se nos presentan como dos conceptos asociados a dos momentos distintos de un mismo proceso. El proceso mediante el

cual el sistemista analiza la realidad por medio de modelos que reproducen su comportamiento. Las cuestiones relativas a la estructura y al comportamiento, que tradicionalmente han estado aparentemente desconexas, aparecen así integradas bajo una misma óptica.

Veamos un ejemplo elemental de lo que estamos diciendo, de particular importancia para la teoría de sistemas: la llamada estructura de *realimentación negativa*. Supóngase un sistema cuya estructura sea la figura 1. Está formado por tres partes *A*, *B* y *C* ligadas entre sí por las relaciones de influencia que se indican en la figura. A cada relación de influencia se asocia un signo, de modo que si este es positivo se quiere indicar que a un incremento -decremento- del antecedente de la relación corresponde un incremento -decremento- del consecuente; mientras que si la relación es negativa a un incremento corresponde un decremento y viceversa. Así, y de acuerdo con la figura 1, a un incremento de *A* corresponderá un incremento de *B*; a este incremento uno de *C*; y este último incremento dará lugar a un decremento de *A*. Por tanto, el incremento inicial de *A* da lugar, a lo largo de las relaciones causales de la estructura del sistema, a una influencia que tiende a anularlo -mediante el decremento que traduce la acción de *C* sobre *A*.

Obsérvese que en la exposición que acaba de hacerse se han empleado indistintamente los símbolos *A*, *B* y *C* para referirse tanto a las partes del sistema como a las magnitudes a ellas asociadas -y que se suponen una por parte.

La estructura anterior recibe la denominación de estructura de realimentación negativa. Los sistemas dotados de ella poseen la notable propiedad de que mediante el mecanismo implícito en esa estructura tratan de atenuar todas las modificaciones que se producen en los valores de las magnitudes a ellos asociadas. Reaccionan frente a las perturbaciones con un talante fuertemente conservador. Estos mecanismos -esta estructura- forman parte, por ejemplo, de los seres vivos y son los responsables del mantenimiento de las constantes vitales. El fenómeno mediante el cual se manifiestan es la llamada *homeostasis*.

También incorporan esta estructura las máquinas dotadas de sistemas de *regulación automática*. Fue precisamente estudiando estas máquinas como mejor se comprendió el funcionamiento de esta estructura (piénsese, por ejemplo, en el funcionamiento de un sistema elemental de regulación de temperatura de una habitación -ver figura 3).

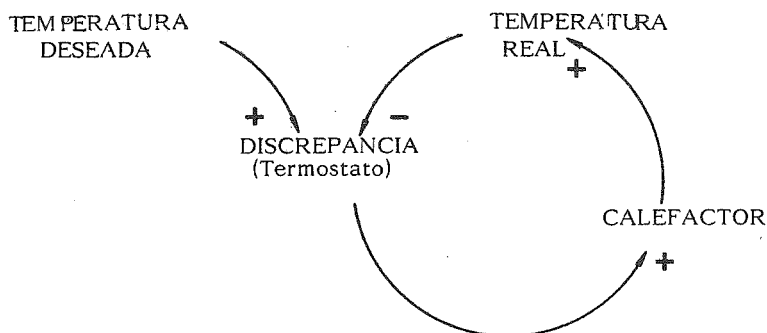


Figura 3

Estructura de realimentación de un sistema de regulación automática de temperatura.

El descubrimiento de la ubicuidad de la estructura de realimentación corresponde a Norbert Wiener quien postuló que subyacía a todo comportamiento propositivo (Wiener 61). En este postulado está el origen de la *cibernética*, tal como la entendió Wiener, que subtítulo su clásico libro: *control y comunicación en el animal y en la máquina* -control y comunicación que se materializan mediante la estructura de realimentación. El interés histórico de este descubrimiento, más allá del que pueda tener por sí mismo, reside en poner de manifiesto que sistemas de naturaleza diferente, pero que presentan pautas de comportamiento análogas, comparten la misma estructura. De este modo, al estudiar el comportamiento es la estructura, y no la naturaleza de las partes del sistema, lo que resulta relevante. Además, con ello, el estudio de los sistemas encuentra un campo que le es particularmente propio. Ya no se trata de estudiar las propiedades específicas de tales o cuales sistemas, sino las generales de todos los que comparten una determinada estructura. Las posibilidades que para la teoría de sistemas abrió el planteamiento de Wiener son inmensas y están aún en una fase incipiente de exploración.

Además de la estructura de realimentación negativa se han estudiado otras estructuras. La más parecida a ella es la de *realimentación positiva*, que permite dar razón de los comportamientos autorreforzados -autocatalíticos en química-, como son el crecimiento explosivo, o el declive progresivo. Otra estructura importante es la de *reacción-difusión*, que aporta un mecanismo que permite explicar comportamientos morfo-

genéticos (Turing 52, Prigogine 80). También cabe citar en este contexto las estructuras *jerarquizadas* (Mesarovic et alii 70), y, en particular, los sistemas que presentan *escalas múltiples de tiempo* -jerarquización en el tiempo (Simon 73). Estos últimos permiten explicar cuestiones relacionadas con el *cambio cualitativo* en el comportamiento de un sistema (Aracil y Toro 84).

El estudio de estas estructuras constituye una de las aportaciones más notables y específicas de la teoría de sistemas. Con ellas se trata de asociar pautas de comportamiento no a la naturaleza de los componentes del sistema, sino a relaciones estructurales asociadas a como se articuló el sistema; es decir, a aquello que le hace tener el carácter de sistema. De este modo, su estudio se desenvuelve en el núcleo de lo que podemos considerar específicamente sistémico. Estas estructuras aparecen en diferentes campos de experiencia, de modo que sistemas de diferente naturaleza presentan formas de comportamiento análogas, en la medida en que comparten la misma estructura.

La relación entre estructura y comportamiento aparece como uno de los aspectos fundamentales de la teoría de sistemas. El hecho de que la teoría de sistemas se ocupe de formas de comportamiento comunes a diferentes campos de la experiencia -entre los que se manifiestan relaciones estructurales análogas- ha llevado a hablar de que esta teoría es una *teoría general de sistemas* (Bertalanffy 76). Se alude a general, como oposición a específica -referida a un campo concreto de la experiencia. Sin embargo, conviene precisar que el sentido en que se habla de general en esa locución es débil y no fuerte; es decir, se habla de general como común a más de un campo de la experiencia, pero no con la pretensión de serlo a todos. En este último caso habría que hablar de teoría universal de sistemas lo cual ya se comprende que es excesivo. Aquí nos ocupamos exclusivamente de la clase de sistemas para cuya descripción se considera que es suficiente la consideración de un conjunto finito de magnitudes x .

5.- Distintos modos de comportamiento en un mismo sistema

De lo visto hasta aquí pudiera desprenderse que la relación que liga a una estructura con un comportamiento es biunívoca. Dada tal estructura el sistema tendrá tal comportamiento. Sin embargo, esta afirmación requiere importantes matizaciones, a las que vamos a dedicar

el resto de este artículo.

Volvamos al conjunto de ecuaciones (1) que constituyen el modelo de un sistema concreto. Estas ecuaciones, una vez integradas mediante un computador, generan el conjunto de trayectorias que representa el comportamiento del sistema. Estas trayectorias dependen de los valores iniciales de partida -las llamadas condiciones iniciales para realizar la integración-, de modo que para cada integración -cada 'pasada' por el computador- obtenemos un conjunto de trayectorias, que representa un comportamiento. Está claro que variando las condiciones iniciales obtendremos otras trayectorias que son distintas manifestaciones de un mismo tipo de comportamiento (por ejemplo, un comportamiento asintótico hacia un mismo estado final, o un comportamiento oscilatorio periódico de una determinada frecuencia). Pero la pregunta que inmediatamente surge es: ¿el hecho de haber identificado un tipo de comportamiento excluye la posibilidad de que haya otros? Y si esto no es así, es decir, si un mismo sistema puede presentar distintos modos de comportamiento, ¿es posible tener una perspectiva global respecto a todos estos modos de comportamiento?

Existe una rama de la teoría matemática de sistemas dinámicos que se ocupa de estas cuestiones: la teoría *cualitativa*. Sus orígenes se remontan a los trabajos de Poincaré y constituyen un intento de síntesis entre métodos geométricos y topológicos para el estudio de sistemas dinámicos. Veamos, aunque sea someramente, como se aborda el análisis cualitativo de un sistema dinámico.

El análisis cualitativo se realiza en el llamado espacio de fases, que es el espacio definido por el conjunto de magnitudes x . En este espacio hay unos puntos especialmente interesantes. Son las soluciones en x al sistema de ecuaciones $A(x) = 0$. Recordando la expresión (1), en estos puntos se tiene que $dx/dt=0$; o sea, corresponden a estados de equilibrio, en los que se anula toda variación. Si estos equilibrios son estables (es decir, si ante cualquier pequeña perturbación que lo separe del equilibrio, el sistema reacciona con una trayectoria que lo devuelve a él), entonces reciben la denominación de *atractores*. Todas las trayectorias que se inicien en un entorno adecuado de tales puntos, que recibe la denominación de *cuenca de atracción* del correspondiente atractor, tienden asintóticamente hacia ese atractor. Pues bien, lo interesante aquí es que si $A(x) = 0$ es una ecuación no lineal, entonces es sabido que pue-

den existir múltiples soluciones en x . Aunque sólo una parte de ellas dé lugar a atractores -sean estables-, es claro que estos podrán ser varios, por lo que el sistema podrá presentar distintos comportamientos a largo plazo -distintas tendencias- y, en ese sentido, distintos modos de comportamiento. En consecuencia, y relacionado con el carácter no lineal del modelo, se pueden tener diferentes modos de comportamiento asociados a un mismo modelo -a una misma estructura de relaciones.

El caso que acabamos de comentar es el más sencillo que se puede dar. Todos los atractores son puntuales: posiciones de equilibrio. En realidad pueden darse atractores más complicados, como curvas cerradas en el espacio de fases. Se tienen entonces modos de comportamiento que en régimen permanente toman la forma de oscilaciones periódicas. Es decir, las magnitudes del sistema nunca se estabilizan en un valor sino que oscilan indefinidamente. A cada uno de estos atractores periódicos puede asociarse, como en el caso de los puntuales, una cuenca de atracción. Conviene reseñar que la totalidad del espacio de estados queda recubierta por las cuencas de atracción de todos los atractores del sistema -sean puntuales o periódicos-, de modo que tomando al azar un punto -unas condiciones iniciales- éste pertenece a una cuenca -y sólo a una-, y, por tanto, el comportamiento que en él se inicia está completamente determinado.

Los modos de comportamiento de un sistema serán tantos como cuencas de atracción muestre su espacio de estados. Recibe la denominación de *retrato de fases* el trazado de un 'mapa' en el espacio de estados que permita clasificar sus distintas regiones en cuencas de atracción en torno a los correspondientes atractores. Este mapa se puede interpretar intuitivamente, si el sistema es bidimensional, como un relieve geográfico, en el que las cuencas de atracción corresponden a distintos valles, separados entre sí por las líneas de cresta. De este modo se alcanza una perspectiva global respecto a los modos de comportamiento del sistema. Con el retrato de fases se ponen de manifiesto cuantos modos de comportamiento cualitativamente diferentes pueden corresponder a una misma estructura.

6.- Comportamientos extraños de un sistema determinista

Si lo hasta aquí expuesto agotase el tema, las cosas serían relativamente sencillas, y los modos de comportamiento, aunque variados,

perfectamente claros y definibles. Lamentablemente las cosas no son así. Fué Poincaré quien al estudiar el llamado problema de los tres cuerpos -Sol, Tierra y Luna, por ejemplo- se encontró con resultados sorprendentes. Las soluciones no eran 'integrables'. No podía resolver analíticamente el problema. Las trayectorias no se ajustaban a las pautas conocidas: los atractores puntuales o periódicos, más arriba mencionados. Las trayectorias, en lugar de converger hacia atractores, presentaban una divergencia creciente con el tiempo difícil de entender.

Estos trabajos constituyen la primera publicación registrada que pone de manifiesto la existencia de lo que luego se han denominado *atractores extraños*. Estos atractores son regiones del espacio que no son ni puntos, ni curvas, ni superficies, ni ninguna figura geométrica conocida. Para su estudio ha habido que acudir a una nueva clase de objetos geométricos, los *fractales*, de dimensión no entera (Mandelbrot 85). No es este el lugar de detenerse en su consideración. Sí hay que decir, sin embargo, que se trata de regiones del espacio acotadas en cuyo interior la trayectoria se comporta erráticamente. No es posible discernir ningún tipo de pauta en el comportamiento de un sistema que presenta un atractor de este tipo, más allá del confinamiento de la trayectoria a una cierta región del espacio (el atractor extraño). Por ejemplo, si se determina el espectro de potencia de una trayectoria de este tipo, aparecen componentes planas análogas a las que se obtienen si se analiza una señal completamente aleatoria. Lo importante y lo sorprendente es que una señal de este tipo esté generada por un mecanismo al que conceptuamos como determinista.

Pero, con ello, no se agotan las sorpresas. Sucede que un sistema dinámico con este tipo de atractor es tal que a una, todo lo pequeña que se quiera, discrepancia en las condiciones iniciales responde con trayectorias que son, no sólo erráticas, sino crecientemente divergentes. Este fenómeno se conoce como *hipersensibilidad a las condiciones iniciales*. Sus implicaciones para el problema de la causalidad y el determinismo son sustanciales.

Consideremos uno de los ejemplos recientes que llevaron a restituir actualidad e interés al estudio de los atractores extraños. A principios de los sesenta, un meteorólogo llamado E.N. Lorenz, se propuso estudiar un modelo simplificado de los fenómenos de circulación atmosférica con el fin de mejorar las previsiones meteorológicas. Llegó a establecer

un sistema dinámico de dimensión tres que parecía ser el modelo más simple posible que retuviese las características del fenómeno estudiado. Pues bien, este modelo presenta formas de comportamiento caótico, del tipo de las encontradas por Poincaré para el problema de los tres cuerpos, Al fenómeno de hipersensibilidad a las condiciones iniciales lo denominó Lorenz de forma muy expresiva: *efecto mariposa*. El aleteo de una mariposa, en cualquier lugar del planeta, representa una variación en las condiciones iniciales que alterará, tarde o temprano, la evolución de las magnitudes asociadas al modelo, en cualquier otro lugar de la tierra. La previsión a largo plazo en meteorología queda, con ello, profundamente cuestionada.

Este ejemplo nos sitúa de lleno ante la brecha que la posibilidad de aparición de atractores extraños, en el comportamiento de un sistema dinámico, provoca entre causalidad y determinismo. Tradicionalmente estos dos conceptos han estado profundamente vinculados.

La posibilidad de explicar un determinado fenómeno, asociándole una estructura causal, parecía que haría posible predeterminar su futuro comportamiento, y, de hecho, era lo que sucedía si el sistema dinámico que modela al proceso en cuestión presenta atractores puntuales o periódicos. En tal caso, el estado inicial -que está situado en una cuenca de atracción- determina completamente el atractor al que evolucionará el sistema. Una pequeña modificación de este estado inicial -tan pequeña que no lo 'saque' de la cuenca- no tendrá ningún efecto importante sobre el comportamiento a largo plazo que presentará el sistema. En este sentido decimos que el comportamiento es determinista: está determinado por sus condiciones iniciales. A eso lo llamamos *determinismo*. La evolución futura es previsible -está determinada- de manera inequívoca.

No sucede lo mismo si el sistema presenta un atractor extraño. Aparte del carácter caótico -carente de pautas- de la trayectoria asociada a cada condición inicial, está el hecho de la hipersensibilidad a las condiciones iniciales. Es claro, que si estas se reproducen con precisión infinita, la trayectoria del sistema, aún caótica, será la misma. Pero esta precisión infinita en la medida de las condiciones iniciales es inalcanzable por lo que con un modelo de un sistema que presente este tipo de atractores no podemos hacer ninguna predicción de su futura evolución, más allá del confinamiento de la trayectoria a la región

que define el atractor extraño.

Este es el hecho que tan profundamente perturbó a Poincaré: en el núcleo mismo de la mecánica, que parecía el baluarte irreductible del determinismo, se encontraba con un caso en el que el empleo de su modelo matemático -el modelo que se obtiene a partir de la mecánica clásica- no permitía hacer predicciones de precisión suficientemente elevada.

7.- Causalidad y determinismo

En los atractores extraños parecen desdibujarse los límites entre lo determinista y lo estocástico. Por una parte, se trata de las trayectorias generadas por un mecanismo causal y, por tanto, parece que se debería poder hablar de determinismo en ese contexto. Pero, por otra parte, estas trayectorias tienen propiedades que en nada se diferencian de las correspondientes a las trayectorias estocásticas. (De hecho, en los computadores se emplean mecanismos deterministas -el computador no puede actuar de otra manera- para generar señales a las que, a todos los efectos, se les asocian propiedades estocásticas; sin embargo, los atractores extraños son algo más que un 'truco' informático).

Rescapulemos un poco sobre lo que estamos diciendo. Según hemos visto, si la vinculación entre las partes del sistema se produce por relaciones de influencia, entonces la estructura del sistema pone de manifiesto cómo la causalidad articula a estas partes. Por tanto, para nosotros es indistinto hablar de estructura del sistema y de causalidad en su seno. Sin embargo, según lo que acabamos de ver en los párrafos anteriores, la causalidad subyacente -la fuerte relación de vinculación entre las partes del sistema- no desemboca necesariamente en el determinismo. Este último concepto presupone que en el estado actual está prefigurada la futura evolución del sistema, pero, como hemos visto, en ciertos casos, el estado actual es un concepto que no es medible con la precisión infinita que se requeriría para que tuviese sentido hablar de esa prefiguración.

Estas ideas, que se encuentran en la actualidad en un estado de gran efervescencia, han llevado a Ilya Prigogine (Prigogine 80 y 83) a postular un nuevo *principio de incertidumbre* que recoja las limitaciones respecto a la capacidad de hacer previsiones con relación a la futura evolución de un sistema debidas a la imprecisión en la determi-

nación de las condiciones iniciales -como consecuencia de la ya tantas veces mencionada hipersensibilidad a las condiciones iniciales. Este principio representaría un hito más en la cadena de principios limitadores de nuestra capacidad de apurar la intelección formalizada de la realidad con que nos ha obsequiado nuestro siglo. Después del principio de constancia de la velocidad de la luz, del de incertidumbre de Heisenberg y del teorema de incompletitud de Gödel, el nuevo principio postulado por Prigogine -que sin duda, será objeto de revisiones hasta que se acepte plenamente por la comunidad científica- parece plantearnos nuevas fisuras en una imagen del mundo simple y mecanicista, como la que nos proponía la física del siglo pasado. Sin embargo, esta pérdida de simplismo no debe de considerarse como una derrota. Al contrario, lo que nos permite es pensar en poder incorporar al mundo de la ciencia formalizada parcelas de la realidad que hasta ahora escapan al excesivo simplismo mecanicista por su inherente complejidad.

La vinculación entre lo determinista y lo estocástico suscita profundas reflexiones. Tradicionalmente se vinculaban causalidad y determinismo. Ya hemos visto hasta qué punto eso no es correcto. Una tentación que surge en este contexto es la de preguntarse: ¿se esconde la libertad en la hipersensibilidad a las condiciones iniciales? Parece como si la ruptura del rígido determinismo que presupone la aparición de los atractores extraños dejase abierta una puerta a una posible interpretación de la aparición de lo *nuevo* en un contexto en el que parecía estar todo completamente prefigurado (recuérdese la célebre afirmación atribuida a Laplace: *dadme las condiciones iniciales y conoceré el futuro del Universo*). En este sentido, ya podemos hablar de reproducir en nuestros modelos fenómenos como la aparición de innovaciones, y hasta de aplicarlos a entender mejor el proceso de creatividad (Prigogine 83).

8.- Determinismo y racionalidad

Las anteriores consideraciones ponen de manifiesto las limitaciones inherentes a la consideración de una descripción de la realidad formada exclusivamente por trayectorias. De acuerdo con ellas, la trayectoria pierde su carácter central en la representación del comportamiento de un sistema. Se requiere algo más. Por ejemplo, una función de distribución de probabilidad de las trayectorias. De este modo, la necesidad de una descripción estocástica surge desde el núcleo mismo de un plan-

ESTRUCTURA Y COMPORTAMIENTO EN TEORIA DE SISTEMAS

teamiento que pudiera pensarse abocado al determinismo.

Como consecuencia de todo lo anterior, la tradicional ecuación *racionalismo = mecanicismo = determinismo* hay que replantearla. Lo que le pedíamos a la razón mecánica era quizá excesivamente simple. Un modelo del mundo de relaciones causales, de corte mecanicista, no parece que pueda subsumir toda la inmensa complejidad de la realidad. Tiene que haber más cosas. El simple esquema del mecanicismo es demasiado estrecho para la portentosa profusión de variedad y de creación que muestra el mundo. Pero cabía el temor de que la caída del mecanicismo, y las limitaciones al determinismo, arrastrasen consigo a la razón, provocando un peligroso retroceso en la estructuración científica de la realidad. Afortunadamente, conceptos como los desarrollados a lo largo de este artículo parecen abrir nuevas posibilidades de entender bajo una óptica causal -racional- formas de comportamiento que por su propia naturaleza parecían escapar a esta forma de descripción. Fue Wiener, allá por los años 40, quien primero apuntó que con una estructura de realimentación negativa era posible dar una interpretación causalista -articulando circularmente relaciones causales- al comportamiento propositivo y, por tanto, aparentemente teleológico. El poder asociar un mecanismo a un comportamiento teleológico causó una cierta conmoción en los medios sensibles a estos planteamientos, y sentó los fundamentos de la rama de la teoría de sistemas a la que hemos aludido en este artículo.

Más recientemente, primero Rashevsky y Turing, de forma precursora, y luego Prigogine, con mayor riqueza de detalles, nos han brindado con su análisis de la estructura de reacción-difusión, un mecanismo que permite dar razón de formas de comportamiento morfogénico e innovador de fuerte poder persuasivo respecto a las posibilidades de alcanzar una mejor comprensión de formas de comportamiento aparentemente ajenas al mecanismo tradicional. Con ello, éste, no ha quedado desplazado, sino subsumido en una visión de la realidad, que es la que puede aportar la emergente teoría de sistemas, que permite escapar de una visión simplista y estrecha del mecanicismo al aportar estructuras causales que pueden dar razón de formas de comportamiento no triviales. De este modo se abren nuevas posibilidades para la búsqueda de una estructura causal y, en esa medida, racional para la intelección de las aparentemente inagotables complejidades que muestra la realidad

en su deslumbrante riqueza de comportamientos.

La construcción de modelos de sistemas nos suministra un útil conceptual en el que se engarza la estructura -que suministra la armazón que subyace al modelo- y el comportamiento -que es generado por ésta. De este modo se dispone de un interesante instrumento para el análisis de ciertos problemas de la realidad en los que la complejidad es la nota dominante. Sin embargo, y antes de terminar éste artículo, conviene decir que los modelos no pretenden ser únicos. Distintas perspectivas dan lugar a modelos diferentes de una misma realidad. De este modo, en la actitud del modelista está implícita una cierta dosis de perspectivismo. Ya no nos parece sensato esperar que la ciencia nos conduzca a alcanzar una estructuración única y rígida que acoja toda nuestra percepción de la realidad. Cada vez nos resulta más asumible la creencia de que el mundo -la inagotable realidad- siempre nos resultará inaccesible en toda su desbordante complejidad. Lo cual no quiere decir que aquí o allá no alcancemos a poner un poco de orden. El análisis de las estructuras de los sistemas y el estudio de los correspondientes comportamientos puede sernos de ayuda para este propósito. Como el artista que dispone los colores de una paleta sobre el lienzo para representar aquellos aspectos de la realidad que atraen su interés, así el sistemista, combinando estructuras, puede construir modelos con los que dar cuenta del comportamiento de los sistemas que estudia, pero, sin olvidar, que con ellos -como le sucede al artista- no agota la inmensidad de lo real. Como se ha dicho (Popper 82), *la realidad se nos escapa por las mallas de nuestras teorías* -de nuestros modelos, diríamos aquí.

REFERENCIAS

- ARACIL, J., 1986a: *Introducción a la dinámica de sistemas*, Alianza Editorial.
- ARACIL, J., 1986b: *Máquinas, modelos y sistemas* (en preparación) Tecnos.
- ARACIL, J., y TORO, M. 1984: "A case study of qualitative change in systems dynamics"; *Int. Journal of Systems Science*, Vol. 15, pp. 575-599.

ESTRUCTURA Y COMPORTAMIENTO EN TEORIA DE SISTEMAS

- BERTALANFFY, L., 1976: *Teoría General de Sistemas*; Fondo de Cultura ra Económica.
- BUNGE, M., 1977: *The furniture of the world*; Reidel.
- BUNGE, M., 1979: *A World of systems*; Reidel.
- PASCAL, B., 1981: *Pensamientos*; Alianza Editorial.
- POPPER, K.R., 1982: "On theories as nets"; *New Scientist*, 29 July, pp. 319-320.
- PRIGOGINE, I., 1980: *Physique, temps et devenir*; Masson.
- PRIGOGINE, I., 1983: *La nueva alianza*; Alianza Editorial.
- MANDELBROT, B., 1985: *The fractal geometry of nature*; Freeman.
- MESAROVIC, M., MACKO, D., y TAKAHARA, Y., 1970: *Theory of hierarchical multilevel systems*; Academic Press.
- ROSEN, R., 1985a: *Anticipatory systems*; Pergamon.
- ROSEN, R., 1985b: *Theoretical Biology and Complexity*; Academic Press.
- SIMON, H.A., 1973: *Las ciencias de lo artificial*, A.T.E..
- TURING, A. 1952: "The chemical basis of morphogenesis"; *Phil Trans. Roy. Soc. B*, Vol. 237, pp. 5-72.
- WIENER, N., 1961: *Cybernetics*; The MIT Press (segunda edición).

Departamento de Automática y Sistemas
Universidad de Sevilla