

**LUDWIG VON  
BERTALANFFY**

**Te** **TEORIA**  
**GENERAL DE**  
**LOS SISTEMAS**



**CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

---

**TEORIA GENERAL DE LOS SISTEMAS**

**Traducción de  
JUAN ALMELA**

*Ludwig von Bertalanffy*

# TEORÍA GENERAL DE LOS SISTEMAS

Fundamentos, desarrollo, aplicaciones



FONDO DE CULTURA ECONÓMICA  
MÉXICO

Primera edición en inglés,	1968
Primera edición en español,	1976
Primera reimpresión,	1979
Segunda reimpresión,	1980
Tercera reimpresión,	1982
Cuarta reimpresión,	1984
Quinta reimpresión,	1986
Sexta reimpresión,	1987
Séptima reimpresión,	1989

Título original:

*General System Theory; Foundations, Development, Applications*

© 1968, Ludwig Von Bertalanffy

Publicado por George Braziller, Nueva York

D. R. © 1976, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

D. R. © 1986, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S.A. DE C.V.

Av. de la Universidad, 975; 03100 México, D.F.

ISBN 968-16-0627-2

Impreso en México

# I. Introducción

## *Sistemas por doquier*

Si alguien se pusiera a analizar las nociones y muletillas de moda hoy por hoy, en la lista aparecería «sistemas» entre los primeros lugares. El concepto ha invadido todos los campos de la ciencia y penetrado en el pensamiento y el habla populares y en los medios de comunicación de masas. El razonamiento en términos de sistemas desempeña un papel dominante en muy variados campos, desde las empresas industriales y los armamentos hasta temas reservados a la ciencia pura. Se le dedican innumerables publicaciones, conferencias, simposios y cursos. En años recientes han aparecido profesiones y ocupaciones, desconocidas hasta hace nada, que llevan nombres como proyecto de sistemas, análisis de sistemas, ingeniería de sistemas y así por el estilo. Constituyen el meollo de una tecnología y una tecnocracia nuevas; quienes las ejercen son los «nuevos utopistas» de nuestro tiempo (Boguslaw, 1965), quienes —en contraste con la cepa clásica, cuyas ideas no salían de entre las cubiertas de los libros— están creando un mundo nuevo, feliz o no.

Las raíces de este proceso son complejas. Por un lado está el tránsito desde la ingeniería energética —la liberación de grandes cantidades de energía, así en las máquinas de vapor o eléctricas— hasta la ingeniería de control, que dirige procesos mediante artefactos de baja energía y que ha conducido a las computadoras y la automatización. Han aparecido máquinas que se autocontrolan, del humilde termostato doméstico a los proyectiles autoguiados de la Segunda Guerra Mundial, y de ahí a los proyectiles inmensamente

perfeccionados de hoy. La tecnología ha acabado pensando no ya en términos de máquinas sueltas sino de «sistemas». Una máquina de vapor, un automóvil o un receptor de radio caían dentro de la competencia del ingeniero adiestrado en la respectiva especialidad. Pero cuando se trata de proyectiles o de vehículos espaciales, hay que armarlos usando componentes que proceden de tecnologías heterogéneas: mecánica, electrónica, química, etc.; empiezan a intervenir relaciones entre hombre y máquina, y salen al paso innumerables problemas financieros, económicos, sociales y políticos. O bien el tráfico aéreo, o incluso automóvil, no es sólo cosa del número de vehículos en funcionamiento sino que son sistemas que hay que planear o disponer. Así vienen surgiendo innumerables problemas en la producción, el comercio y los armamentos.

Se hizo necesario, pues, un «enfoque de sistemas». Dado un determinado objetivo, encontrar caminos o medios para alcanzarlo requiere que el especialista en sistemas (o el equipo de especialistas) considere soluciones posibles y elija las que prometen optimización, con máxima eficiencia y mínimo costo en una red de interacciones tremendamente compleja. Esto requiere técnicas complicadas y computadoras para resolver problemas que van muchísimo más allá de los alcances de un matemático. Tanto el *hardware* («quincalla» se ha dicho en español) de las computadoras, la automatización y la cibernación, como el *software* de la ciencia de los sistemas, representan una nueva tecnología que ha sido llamada Segunda Revolución Industrial y sólo lleva unas décadas desenvolviéndose.

Esta situación no se ha limitado al complejo industrial-militar. Los políticos suelen pedir que se aplique el «enfoque de sistemas» a problemas apremiantes, tales como la contaminación del aire y el agua, la congestión de tráfico, la plaga urbana, la delincuencia juvenil y el crimen organizado, la planeación de ciudades (Wolfe, 1967), etc., y hablan de este «nuevo concepto revolucionario» (Carter, 1966; Boffey, 1967). Un primer ministro canadiense (Manning, 1967) inserta el enfoque de sistemas en su plataforma política:

...existe una interrelación entre todos los elementos y constituyentes de la sociedad. Los factores esenciales en los problemas, puntos, políticas y programas públicos deben ser siempre considerados y evaluados como componentes interdependientes de un sistema total.

Semejante evolución no pasaría de ser otra de las numerosas facetas de cambio en nuestra sociedad tecnológica contemporánea,



si no fuera por un factor significativo fácil de ser pasado por alto en las técnicas tan sutiles y forzosamente especializadas de la ciencia de la computación, la ingeniería de sistemas y campos afines. No sólo está la tendencia, en la tecnología, a hacer cosas mayores y mejores (o, si no, más provechosas, destructivas, o todo a la vez), sino que hay un cambio en las categorías básicas del pensamiento, del cual las complejidades de la tecnología moderna no pasan de ser una manifestación, acaso ni la más importante. De uno u otro modo estamos forzados a vérnoslas con complejidades, con «totalidades» o «sistemas», en todos los campos del conocimiento. Esto implica una fundamental reorientación del pensamiento científico.

No sería factible tratar de resumir la repercusión de los «sistemas», lo cual, por lo demás, dejaría fuera las consideraciones de este libro. Tendrán que bastar unos cuantos ejemplos, elegidos más o menos arbitrariamente, a fin de bosquejar la naturaleza del problema y la consiguiente reorientación. El lector dispensará el toque egocéntrico en las citas, ya que el propósito del libro es presentar el punto de vista del autor y no reseñar el campo con neutralidad.

Es bien sabido que en física se han dado enormes pasos en las últimas décadas, lo cual ha generado también problemas nuevos —o quizás un nuevo tipo de problema—, tal vez más evidentes para el lego en el número indefinido —van centenares— de partículas elementales, de la que la física al presente puede dar poca razón. Según un experto destacado (De-Shalit, 1966), el ulterior progreso de la física nuclear «requiere mucha labor experimental, así como el surgimiento de más métodos poderosos para manejar sistemas de partículas numerosas, pero no infinitas». A. Szent-Györgyi (1964), el gran fisiólogo, expresó con humor la misma ambición:

[Cuando me agregué al Institute for Advanced Study of Princeton] lo hice con la esperanza de que codeándome con aquellos grandes físicos atómicos y matemáticos aprendería algo acerca de las cosas vivas. Pero en cuanto revelé que en cualquier sistema vivo hay más de dos electrones, los físicos no quisieron oír más. Con todas sus computadoras, no podían decir qué haría el tercer electrón. Lo notable es que éste lo sabe exactamente, así que el pequeño electrón sabe algo que ignoran todos

los sabios de Princeton, por lo cual tiene que ser algo muy sencillo.

Y Bernal (1957) formuló de este modo el problema aún no resuelto:

Nadie que conozca las dificultades de ahora se figura que la crisis de la física seguramente se resuelva merced a algún simple truco o modificación de las teorías existentes. Es preciso algo radical, que habrá de llegar mucho más allá de la física. Está siendo forjada una nueva visión del mundo, pero serán precisas mucha experiencia y mucha controversia antes de que adquiera forma definitiva. Tendrá que ser coherente, que incluir y esclarecer el nuevo conocimiento de las partículas fundamentales y sus complejos campos, que resolver la paradoja de la onda y la partícula, deberá hacer igualmente inteligibles el mundo interior del átomo y los vastos espacios del universo. Deberá tener una dimensión distinta de todas las visiones del mundo previas, e incluir una explicación del desarrollo y el origen de cosas nuevas. Con ello se acoplará naturalmente a las tendencias convergentes de las ciencias biológicas y sociales, donde una pauta regular se trenza con su historia evolutiva.

El triunfo de la biología molecular en años recientes, el «desciframiento» del código (o clave) genético, y los consiguientes logros en genética, evolución, medicina, fisiología celular y muchos otros campos, es ya lugar común. Pero a pesar del discernimiento ahondado que alcanza la biología «molecular» —o acaso en virtud de él—, es manifiesta la necesidad de una biología «organísmica», según el presente autor lo llevaba sosteniendo unos 40 años. La biología no sólo tiene que ocuparse del nivel fisicoquímico o molecular, sino de los niveles superiores de organización viva también. Tal como discutiremos más adelante (p. 10), esta exigencia se ha planteado con renovado vigor, en vista de recientes hechos y conocimientos, pero difícilmente se habrá agregado un argumento que no hubiera sido discutido antes (von Bertalanffy, 1928a, 1932, 1949a, 1960).

Por otro lado, en psicología la concepción básica solía ser el «modelo robot». Había que explicar la conducta con el esquema mecanicista estímulo-respuesta (E-R); el condicionamiento, acorde con la pauta del experimento con animales, aparecía como funda-

mento de la conducta humana; tenía que reemplazarse el «significado» por la respuesta condicionada, que negarse la especificidad del comportamiento humano, etc. La psicología de la *Gestalt* fue la primera en enfrentarse al esquema mecanicista hace cosa de medio siglo. Más recientemente se han visto muchos intentos encaminados a una «imagen del hombre» más satisfactoria, y el concepto de sistema va ganando importancia (cap. VIII); Piaget, por ejemplo, «vinculó expresamente sus conceptos a la teoría general de los sistemas de Bertalanffy» (Hahn, 1967).

Quizás aun más que la psicología, la psiquiatría ha adoptado el punto de vista de los sistemas (p. ej. Menninger, 1963; von Bertalanffy, 1966; Grinker, 1967; Gray *et al.*, en prensa). Citemos a Grinker:

De las teorías llamadas globales, la que primero enunció y definió Bertalanffy en 1947 con el nombre de «teoría general de los sistemas» ha prendido... Desde entonces ha afinado, modificado y aplicado sus conceptos, establecido una sociedad dedicada a la teoría general de los sistemas y publicado un *General Systems Yearbook*. Muchos científicos sociales pero sólo un puñado de psiquiatras estudiaban, entendían o aplicaban la teoría de los sistemas. De pronto, bajo la guía del doctor William Gray, de Boston, se alcanzó un umbral, la reunión anual 122 de la American Psychiatric Association dedicó dos sesiones, en 1966, a la discusión de esta teoría, y se dispuso que en adelante hubiera reuniones regulares de psiquiatras para desarrollar esta «teoría unificada del comportamiento humano». De existir la tercera revolución (después de la psicoanalítica y la conductista), reside en el desenvolvimiento de una teoría general (p. ix).

El informe de una reciente reunión (American Psychiatric Association, 1967) pinta un vívido cuadro:

Cuando una sala para 1500 personas está atiborrada al punto de que hay cientos en pie durante una sesión matutina entera, el tema debe de interesar de veras al auditorio. Tal fue la situación en el simposio sobre el uso de una teoría general de los sistemas en psiquiatría, celebrado dentro de la reunión de la American Psychiatric Association en Detroit. (Damude, 1967.)

Lo mismo pasa en las ciencias sociales. Del vasto espectro, la extendida confusión y las contradicciones de las teorías sociológicas contemporáneas (Sorokin, 1928, 1966) emerge una conclusión segura: que los fenómenos sociales deben ser considerados en términos de «sistemas» —por difícil y hoy en día fluctuante que sea la definición de entidades socioculturales.

Hay un panorama científico revolucionario [derivado] del movimiento de investigación general de los sistemas, [con un] cúmulo de principios, ideas y ahondamientos que ya han establecido un grado superior de orden y de comprensión científicos en muchas áreas de la biología, la psicología y algunas ciencias físicas... La moderna investigación de los sistemas puede servir de base a un marco más adecuado para hacer justicia a las complejidades y propiedades dinámicas del sistema sociocultural. (Buckley, 1967.)

El curso de los acontecimientos en nuestros tiempos sugiere una concepción análoga en la historia, incluyendo la consideración de que, después de todo, la historia es sociología haciéndose, estudiada «longitudinalmente». Son las mismas entidades socioculturales las que la sociología investiga en su estado presente y la historia en su devenir.

En otros tiempos puede haber servido de consuelo echar la culpa de atrocidades y estupideces a malos reyes, pérfidos dictadores, la ignorancia, la superstición, las carencias materiales y cosas así. Por ello la historia era del estilo «quién-hizo-qué»: «idiográfica» es el término técnico. Así, la Guerra de los Treinta años fue consecuencia de la superstición religiosa y de las rivalidades de los príncipes alemanes; Napoleón puso a Europa de cabeza en virtud de su ambición desmedida; la Segunda Guerra Mundial se debió a la perversidad de Hitler y a la proclividad bélica de los alemanes.

Hemos perdido este bienestar intelectual. En condiciones de democracia, instrucción universal y abundancia general, aquellas excusas de las atrocidades humanas fracasan miserablemente. Al contemplar cómo se hace la historia contemporánea, resulta difícil adscribir su irracionalidad y bestialidad a individuos nada más (a menos que les otorguemos una capacidad sobrehumana —o subhumana— para la maldad y la estupidez). Más bien parecemos víctimas de «fuerzas históricas»; sea lo que fuere lo que esto quiera decir. Los acontecimientos parecen envolver algo más que

las decisiones y acciones individuales, y estar determinados más bien por «sistemas» socioculturales, trátase de prejuicios, ideologías, grupos de presión, tendencias sociales, el crecimiento y la decadencia de civilizaciones y quién sabe cuánto más. Sabemos científica y precisamente cuáles van a ser los efectos de la contaminación, el despilfarro de los recursos naturales, la explosión demográfica, la carrera armamentista, etc. Cada día nos los repiten incontables críticos que esgrimen argumentos irrefutables. Pero ni los guías nacionales ni la sociedad en conjunto parecen en condiciones de hacer nada por remediarlo. Si no queremos una explicación teista —*quem Deus perdere vult dementat*—, parecemos seguir alguna trágica necesidad histórica.

Aun apreciando la vaguedad de conceptos como el de civilización y las limitaciones de «grandes teorías» como las de Spengler y Toynbee, la cuestión de las regularidades o leyes en los sistemas socioculturales tiene sentido aunque esto no implique por fuerza la inevitabilidad histórica según Sir Isaiah Berlin. Un panorama histórico como el que McNeill intituló *The Rise of the West* (1963), subrayando desde el título su posición antispengleriana, no deja de ser, con todo, una exposición de sistemas históricos. Semejante concepción invade campos que se dirían aparte, de modo que la «escuela arqueológica 'de proceso'» se dice «surgida del armazón debido a Ludwig von Bertalanffy para el caso del embrión en desarrollo, en el cual los sistemas desencadenan el comportamiento en coyunturas críticas y, luego de hacerlo, no pueden retornar a su pauta de origen» (Flannery, 1967).

En tanto que la sociología (y presumiblemente la historia) trata de organizaciones informales, otro adelanto reciente es la teoría de las organizaciones formales, o sea de estructuras escrupulosamente instituidas, tales como el ejército, la burocracia, las empresas de negocios, etc. Esta teoría está «enmarcada en una filosofía que acepta la premisa de que el único modo significativo de estudiar la organización es estudiarla como sistema», y el análisis de sistemas trata de la «organización como sistema de variables mutuamente dependientes»; de ahí que «la moderna teoría de la organización conduzca casi inevitablemente a una discusión de la teoría general de los sistemas» (Scott, 1963). En palabras de alguien que practica la investigación operacional:

En las últimas décadas hemos asistido al surgimiento

del «sistema» como concepto clave en la investigación científica. Ni que decir tiene, desde hace siglos que se estudian sistemas, pero ha sido agregado algo nuevo... La tendencia a estudiar sistemas como entidades más que como conglomerados de partes es congruente con la tendencia de la ciencia contemporánea a no aislar ya fenómenos en contextos estrechamente confinados sino, al contrario, abrir interacciones para examinarlas y examinar segmentos de la naturaleza cada vez mayores. Bajo la bandera de *investigación de sistemas* (y sus abundantes sinónimos) hemos presenciado también la convergencia de muchos más adelantos científicos especializados contemporáneos... Esta indagación, como tantas otras, está imbricada en un esfuerzo cooperativo que abarca una gama creciente de disciplinas científicas y de ingeniería. Participamos en un esfuerzo —acaso el más vasto hasta la fecha— por alcanzar una síntesis del conocimiento científico. (Ackoff, 1959.)

De esta manera se cierra el círculo y volvemos a los avances de la sociedad tecnológica contemporánea de los cuales partimos. Lo que se deduce de estas consideraciones —por esbozadas y superficiales que sean— es que en las ciencias modernas y las nuevas conceptualizaciones de la vida hacen falta nuevas ideas y categorías, las cuales, de una u otra manera, giran en torno al concepto de «sistema». Para variar, citemos a un autor soviético:

La elaboración de métodos específicos para la investigación de sistemas es una tendencia general del conocimiento científico de hoy, al igual que la ciencia del XIX se caracterizaba por la concentración primaria de la atención en la elaboración de formas y procesos elementales de la naturaleza. (Lewada, en Hahn, 1967, p. 185.)

Los peligros de semejante tendencia son evidentes, por desgracia, y han sido expuestos a menudo. Según el psicoterapeuta Ruesch (1967), al nuevo mundo cibernético no le importa la gente sino los «sistemas»; el hombre se vuelve reemplazable y gastable. Para los nuevos utopistas de la ingeniería de sistemas, por repetir una frase de Boguslaw (1965), precisamente es el «elemento humano» el componente inconfiable de sus creaciones. O bien se elimina del todo, sustituyéndolo por el *hardware* de computadoras, maquinaria autorregulada y así por el estilo, o bien hay que hacerlo tan

confiable como se pueda: mecanizado, conformista, controlado y estandarizado. Dicho con términos algo más ásperos, en el Gran Sistema el hombre ha de ser —y en gran medida lo es ya— un retrasado mental que oprime botones, o un idiota informado —quiere decirse—: adiestrado en alguna especialidad limitada, pero por lo demás simple parte de la máquina. Esto concuerda con un bien conocido principio de sistemas, el de la mecanización progresiva; el individuo se convierte cada vez más en un engranaje dominado por unos pocos guías privilegiados, mediocres y chanchulleros, que persiguen sus intereses privados tras la cortina de humo de las ideologías (Sorokin, 1966, pp. 558ss).

Ya contemplemos la expansión positiva del conocimiento y el control benéfico del medio y la sociedad, ya veamos en el movimiento de los sistemas la llegada del *Mundo feliz* y de 1984, el hecho es que esto merece estudio intenso, y con él tenemos que vernos.

### *En torno a la historia de la teoría de los sistemas*

Hemos visto ya que en todos los campos principales —de la física subatómica a la historia— reina el consenso acerca de la oportunidad de una reorientación de la ciencia. Hay progresos de la tecnología moderna paralelos a esta tendencia.

Por lo que alcanza a averiguarse, la idea de una «teoría general de los sistemas» fue primero introducida por el presente autor, antes de la cibernética, la ingeniería de sistemas y el surgimiento de campos afines. Más adelante quedará expuesto (pp. 92 ss) cómo se vio llevado a ello, pero en vista de discusiones recientes parece indicada cierta ampliación.

Como pasa con toda nueva idea, en la ciencia o donde sea, el concepto de sistemas tiene una larga historia. Si bien el término «sistema» como tal no mereció hincapié, la historia del concepto incluye muchos nombres ilustres. Como «filosofía natural» podemos remontarlo a Leibniz; a Nicolás de Cusa con su coincidencia de los opuestos; a la medicina mística de Paracelso; a la visión de la historia, de Vico e Ibn-Kaldun, como sucesión de entidades o «sistemas» culturales; a la dialéctica de Marx y Hegel —por mencionar unos cuantos nombres de una rica panoplia de pensadores. El conocedor literario podrá recordar *De ludo globi* (1463; cf. Bertalanffy, 1928b) de Nicolás de Cusa, y el *Glasperlenspiel*

de Hermann Hesse: ambos ven el andar del mundo reflejado en un juego abstracto, agudamente planeado.

Hubo una que otra obra preliminar en el terreno de la teoría general de los sistemas. Las «*Gestalten* físicas» de Köhler (1924) apuntaban en esta dirección pero no encaraban el problema con generalidad plena y restringían el tratamiento a *Gestalten* en física (y a fenómenos biológicos y psicológicos presumiblemente interpretables sobre esta base). En una publicación posterior (1927), Köhler planteó el postulado de una teoría de los sistemas encaminada a elaborar las propiedades más generales de los sistemas inorgánicos, en comparación con los orgánicos; hasta cierto punto, al encuentro de esta exigencia salió la teoría de los sistemas abiertos. La obra clásica de Lotka (1925) fue la que más cerca llegó del objetivo, y le debemos formulaciones fundamentales. La verdad es que Lotka se ocupó de un concepto general de los sistemas (sin restringirse, como Köhler a sistemas de la física). Como era estadístico, sin embargo, interesado en problemas de poblaciones más bien que en problemas biológicos de organismos individuales, Lotka —cosa algo rara— concibió las comunidades como sistemas, sin dejar de ver en el individuo una suma de células.

No obstante, la necesidad y factibilidad de un enfoque de sistemas no fue evidente hasta hace poco. Resultó por necesidad del hecho de que el esquema mecanicista de vías causales aislables y el tratamiento merista resultaban insuficientes para enfrentarse a problemas teóricos, especialmente en las ciencias biosociales, y a los problemas prácticos planteados por la tecnología moderna. Su factibilidad quedó en claro gracias a distintos adelantos —teóricos, epistemológicos, matemáticos, etc.— que, aunque aún entre balbuceos, lo volvieron progresivamente realizable.

A principios de la tercera década del siglo, quien esto escribe se sentía desconcertado ante vacíos evidentes en la investigación y la teoría biológicas. El enfoque mecanicista entonces imperante y que acaba de ser mencionado parecía desdeñar, si no es que negar activamente, lo que es, ni más ni menos, esencial en los fenómenos de la vida. El autor abogó por una concepción organismica en biología que hiciera hincapié en la consideración del organismo como un todo o sistema y viese el objetivo principal de las ciencias biológicas en el descubrimiento de los principios de organización a sus diversos niveles. Los primeros enunciados del autor datan de 1925-26, y la filosofía del «mecanicismo orgánico» de Whitehead



fue publicada en 1925. Las labores de Cannon sobre la homeostasia aparecieron en 1929 y 1932. La concepción organicista tuvo un gran precursor en Claude Bernard, pero la obra de éste casi no fue conocida fuera de Francia, y aún hoy sigue esperando ser cabalmente apreciada (cf. Bernal, 1957, p. 960). La aparición simultánea de ideas similares, independientemente y en diferentes continentes, fue sintomática de una nueva tendencia que, sin embargo, requeriría tiempo para ser aceptada.

Lo que incita a estas observaciones es el hecho de que en años recientes han vuelto a insistir en la «biología organicista» eminentes biólogos estadounidenses (Dubos, 1964, 1967; Dobzhansky, 1966; Commoner, 1961), sin citar, no obstante, las labores muy anteriores de quien esto escribe, por mucho que sean debidamente reconocidas en la bibliografía europea y de los países socialistas (p. ej. Ungerer, 1966; Blandino, 1960; Tribiño, 1946; Kanaev, 1966; Kamaryt, 1961, 1963; Bendmann, 1963, 1967; Afanasjew, 1962). Puede afirmarse de plano que discusiones recientes (p. ej. Nagel, 1961; Hempel, 1965; Beckner, 1959; Smith, 1966; Schaffner, 1967), aunque refiriéndose por supuesto a adelantos de la biología durante los últimos 40 años, no han agregado ningún nuevo punto de vista en comparación con el trabajo del presente autor.

En filosofía, la formación del autor siguió la tradición del neopositivismo del grupo de Moritz Schlick, posteriormente llamado Círculo de Viena. Pero, como tenía que ser, su interés en el misticismo alemán, el relativismo histórico de Spengler y la historia del arte, aunado a otras actitudes no ortodoxas, le impidió llegar a ser un buen positivista. Eran más fuertes sus lazos con el grupo berlinés de la Sociedad de Filosofía Empírica en los años veintitantos; allí descollaban el filósofo-físico Hans Reichenbach, el psicólogo A. Herzberg, el ingeniero Parseval (inventor del dirigible).

En conexión con trabajos experimentales acerca del metabolismo y el crecimiento, por una parte, y con un esfuerzo por concretar el programa organicista, por otra, fue adelantada la teoría de los sistemas abiertos, fundada en el hecho bastante trivial de que el organismo resulta ser uno de ellos, si bien por aquel entonces no había teoría. La primera presentación, luego de uno que otro intento, figura en este volumen como capítulo v. De suerte que la biofísica parecía requerir una expansión de la teoría física acostumbrada, por el rumbo de la generalización de los principios

cinéticos y de la teoría termodinámica, la cual más tarde sería conocida como termodinámica irreversible.

Quedó de manifiesto entonces otra generalización. En muchos fenómenos biológicos, pero también de las ciencias sociales y del comportamiento, resultan aplicables expresiones y modelos matemáticos. Evidentemente, no es cosa de las entidades de la física y la química, y en este sentido trascienden la física como paránón de «ciencia exacta». (Dicho sea de paso, el autor inició una serie, *Abhandlungen zur exakten Biologie*, para suceder a las *Abhandlungen zur theoretischen Biologie* de Schaxel, pero hubo que suspenderlas por la guerra.) La similitud estructural entre semejantes modelos y su isomorfismo en diferentes campos se tornaron ostensibles, y en el centro quedaron precisamente problemas de orden, organización, totalidad, teleología, etc., excluidos programáticamente de la ciencia mecanicista. Tal fue, la idea de la «teoría general de los sistemas».

Los tiempos no eran favorables. La biología era tenida por idéntica al trabajo de laboratorio, y el autor entró en un limbo al publicar su *Theoretische Biologie* (1932), otro campo que no hace mucho pasó a ser académicamente respetable. Hoy por hoy, cuando hay tantas revistas y publicaciones de esta disciplina y la elaboración de modelos se ha convertido en pasatiempo bien visto y generosamente patrocinado, no es fácil imaginar la resistencia a aquellas ideas. La afirmación del concepto de la teoría general de los sistemas, especialmente por el difunto profesor Otto Pötzl, psiquiatra de Viena bien conocido, ayudó al autor a superar sus inhibiciones y preparar un escrito (reproducido como capítulo III de este libro). Una vez más intervino el destino. El artículo (en la *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*) fue leído en pruebas, pero el número que lo traía quedó destruido en la catástrofe de la última guerra. Pasada ésta, la teoría general de los sistemas fue presentada en conferencias (cf. Apéndice), ampliamente discutida con físicos (von Bertalanffy, 1948a) y en pláticas y coloquios (p. ej. von Bertalanffy *et al.*, 1951).

La propuesta de la teoría de los sistemas fue recibida con incredulidad, por fantástica o presuntuosa. O bien —decían— era *trivial*, por no ser los llamados isomorfismos sino meros ejemplos del hecho palmario de resultar aplicables las matemáticas a toda suerte de cosas, lo cual no llevaba a mayor «descubrimiento» que la aplicabilidad de  $2 + 2 = 4$  a manzanas, dineros y galaxias por igual;

o bien era *falsa y equivoca*, en vista de que analogías superficiales —como en la famosa comparación de la sociedad con un «organismo»— disimulan diferencias genuinas y conducen así a conclusiones erradas y hasta moralmente objetables. Para otros, en fin, era filosófica y metodológicamente *inválida* porque la pretendida «irreductibilidad» de niveles superiores a inferiores tendía a impedir una indagación analítica cuyo éxito era evidente en varios campos, como la reducción de la química a principios físicos, o de los fenómenos de la vida a la biología molecular.

Gradualmente fue viéndose que tales objeciones no atinaban con lo que representa la teoría de los sistemas: intentar la interpretación y la teoría científicas donde antes no había nada de ello, así como mayor generalidad que en las ciencias especiales. La teoría general de los sistemas respondía a una secreta tendencia en varias disciplinas. Una carta del economista K. Boulding, fechada en 1953, resumió bien la situación:

He llegado casi casi a la misma conclusión que usted, aunque partiendo del rumbo de la economía y las ciencias sociales, y no de la biología: que hay un cuerpo de lo que vengo llamando «teoría empírica general», o «teoría general de los sistemas» —por usar su excelente terminología—, de amplia aplicabilidad a muy diversas disciplinas. Estoy seguro de que mucha gente en el mundo ha llegado a posiciones esencialmente iguales a la nuestra, pero están muy dispersos y no se conocen: así de difícil es cruzar los límites entre las disciplinas.

Durante el primer año del Center for Advanced Study in the Behavioral Sciences (Palo Alto), se encontraron Boulding, el biomatemático A. Rapoport, el fisiólogo Ralph Gerard y el presente autor. En la reunión anual de la American Association for the Advancement of Science de 1954 cuajó el proyecto de una sociedad dedicada a la teoría general de los sistemas. El nombre fue cambiado luego por el menos presuntuoso de Sociedad para la Investigación General de Sistemas, afiliada ahora a la AAAS y cuyas reuniones son muy concurridas en las convenciones de la AAAS. Fueron establecidos grupos locales de la Sociedad en varios centros, primero de Estados Unidos, luego de Europa. El programa original de la Sociedad no necesitó revisión:

La Sociedad para la Investigación General de Sistemas fue organizada en 1954 para impulsar el desarrollo de sistemas teóri-

cos aplicables a más de uno de los compartimientos tradicionales del conocimiento. Sus funciones principales son: 1) investigar el isomorfismo de conceptos, leyes y modelos en varios campos, y fomentar provechosas transferencias de un campo a otro; 2) estimular el desarrollo de modelos teóricos adecuados en los campos que carecen de ellos; 3) minimizar la repetición de esfuerzo teórico en diferentes campos; 4) promover la unidad de la ciencia mejorando la comunicación entre especialistas.

Los anuarios de la sociedad, *General Systems*, bajo la eficiente redacción de A. Rapoport, le han servido de órgano desde entonces. *General Systems*, intencionalmente, no sigue una política rígida sino que publica trabajos que difieren en intención, según parece convenir a un campo necesitado de ideas y exploración. Numerosas investigaciones y publicaciones sustanciaron la tendencia en varios campos; apareció una revista, *Mathematical Systems Theory*.

Mientras tanto hubo otro progreso, *Cybernetics* de Norbert Wiener apareció en 1948, como resultado de los adelantos entonces recientes en la tecnología de las computadoras, la teoría de la información y las máquinas autorreguladas. Otra vez se dio una coincidencia de las que se presentan cuando hay ideas en el aire: aparecieron casi al mismo tiempo tres contribuciones fundamentales, la *Cybernetics* de Wiener (1948), la teoría de la información de Shannon y Weaver (1949) y la teoría de los juegos de von Neumann y Morgenstern (1947). Wiener llevó los conceptos de cibernética, retroalimentación e información mucho más allá de los campos de la tecnología, y los generalizó en los dominios biológico y social. Es verdad que la cibernética no careció de precursores. El concepto de homeostasia debido a Cannon fue piedra angular en estas consideraciones. Menos conocidos modelos detallados de fenómenos fisiológicos con retroalimentación habían sido elaborados en la tercera década por el fisiólogo alemán Richard Wagner (1954), por el laureado Nobel suizo W. R. Hess (1941, 1942), y en el *Rafferenzprinzip* de von Holst. La enorme popularidad de la cibernética en la ciencia, la tecnología y la publicidad general se debe, ni que decir tiene, a Wiener, con su proclamación de la Segunda Revolución Industrial.

La estrecha correspondencia entre los dos movimientos queda de manifiesto en un enunciado programático de L. Frank, abriendo una conferencia de cibernética:

Los conceptos de conducta intencional y de teleología se han asociado por largo tiempo a una misteriosa capacidad auto-perfectiva o buscadora de metas, o causa final, ordinariamente de origen sobrehumano o sobrenatural. Para adelantar en el estudio de los aconteceres, el pensamiento científico tuvo que rechazar semejantes creencias en el propósito y en conceptos de operaciones teleológicas, en favor de una visión estrictamente mecanicista y determinista de la naturaleza. Esta concepción mecanicista quedó firmemente establecida con la demostración de que el universo se basaba en la operación de partículas anónimas que se movían al azar, de modo desordenado, generando, con su multiplicidad, orden y regularidad de naturaleza estadística, como en la física clásica y las leyes de los gases. El triunfo irrefutable de tales conceptos y métodos en física y astronomía, y luego en química, dio a la biología y la fisiología su orientación preponderante. Este enfoque de los problemas de los organismos fue reforzado por los afanes analíticos de la cultura y los lenguajes de la Europa occidental. Los supuestos básicos de nuestras tradiciones y las persistentes implicaciones del lenguaje que usamos, casi nos fuerzan a abordar todo lo que estudiamos como si estuviera compuesto de partes o factores separados, discretos, que debemos tratar de aislar e identificar como causas potentes. De ahí derivamos nuestra preocupación por el estudio de la relación entre dos variables. Somos hoy testigos de una búsqueda de nuevos enfoques, de conceptos nuevos y más amplios y de métodos capaces de vérselas con grandes conjuntos de organismos y personalidades. El concepto de mecanismo teleológico, sin importar cómo pueda ser expresado en términos diferentes, puede verse como un intento de escapar de estas viejas formulaciones mecanicistas que hoy resultan inadecuadas, y de presentar nuevas y fecundas concepciones y metodologías más efectivas para estudiar los procesos de auto-regulación, los sistemas y organismos con autoorientación y las personalidades que se autodirigen. Así, expresiones como *retroalimentación*, *servomecanismos*, *sistemas circulares* y *procesos circulares* pueden ser tomadas como expresiones distintas pero en gran medida equivalentes de la misma concepción. (Frank et al., 1948, condensado.)

Reseñar el desarrollo de la cibernética en la tecnología y la

ciencia sería salir de los alcances de este libro, además de ser innecesario, en vista de la rica bibliografía de este campo. A pesar de ello este repaso histórico no deja de ser oportuno en vista de ciertas equivocaciones e interpretaciones erradas. Así, Buckley (1967, p. 36) afirma que «la moderna teoría de los sistemas, aunque surgida al parecer *de novo* a partir del esfuerzo de la última guerra, puede verse como culminación de un vasto cambio de punto de vista, que llevaba unos siglos tratando de imponerse». La segunda parte del enunciado es cierta, mas no la primera; la teoría de los sistemas no surgió «del esfuerzo de la última guerra» sino que se remonta a mucho más atrás y tiene raíces muy distintas del *hardware* militar y cuestiones tecnológicas afines. Tampoco hay «emergencia de la teoría de los sistemas a partir de recientes adelantos en el análisis de sistemas de ingeniería» (Shaw, 1965), excepto en un sentido especial de la palabra.

La teoría de los sistemas es también frecuentemente identificada con la cibernética y la teoría del control. Esto es asimismo incorrecto. La cibernética, como teoría de los mecanismos de control en la tecnología y la naturaleza, fundada en los conceptos de información y retroalimentación, no es sino parte de una teoría general de los sistemas; los sistemas cibernéticos son un caso especial —por importante que sea— de los sistemas que exhiben autorregulación.

### *Tendencias en la teoría de los sistemas*

En tiempos en que cualquier novedad, por trivial que sea, es saludada llamándola revolucionaria, está uno harto de aplicar este rótulo a los adelantos científicos. En vista de que la minifalda y el cabello largo se designan como una revolución en la adolescencia, y cualquier nuevo modelo de automóvil o de potingue lanzado por la industria farmacéutica constituyen revoluciones también, la palabra es una muletilla publicitaria que no merece consideración seria. Puede, sin embargo, ser empleada en un sentido estrictamente técnico: las «revoluciones científicas» son identificables merced a ciertos criterios diagnósticos.

A la zaga de Kuhn (1962), una revolución científica es definida por la aparición de nuevos esquemas conceptuales o «paradigmas». Estos ponen en primer plano aspectos que anteriormente no eran vistos o percibidos, o por ventura ni suprimidos, en la ciencia «normal», es decir la ciencia aceptada y practicada generalmente en el tiempo en cuestión. Hay así un desplazamiento de la problemá-

tica advertida e investigada y un cambio en las reglas de la práctica científica, comparable a la mutación de *Gestalten* perceptuales en experimentos psicológicos en que, p. ej., la misma figura puede ser vista como dos caras y una taza o como un pato y un conejo. Es comprensible que en tales fases críticas se haga hincapié en el análisis filosófico, no sentido como necesario en períodos de crecimiento de la ciencia «normal». Las primeras versiones de un nuevo paradigma suelen ser toscas, resuelven pocos problemas, y las soluciones que dan a éstos distan de ser perfectas. Hay profusión y competencia de teorías, limitada cada una con respecto al número de problemas que cubre y resuelve con elegancia. Sin embargo, el nuevo paradigma abarca nuevos problemas, especialmente los que antes eran rechazados por «metafísicos».

Kuhn dedujo estos criterios del estudio de las revoluciones «clásicas» en física y química, pero describen de maravilla los cambios acarreados por los conceptos organísmico y de sistemas; además de difundir sus méritos y limitaciones. Especialmente, y no hay que sorprenderse, la teoría de los sistemas comprende un conjunto de enfoques que difieren en estilo y propósito.

El problema de los sistemas es esencialmente el problema de las limitaciones de los procedimientos analíticos en la ciencia. Esto solía ser expresado en enunciados semimetafísicos, como el de la evolución emergente y lo de que «el todo es más que la suma de sus partes», pero tiene un sentido operacional claro. «Proceder analítico» quiere decir que una entidad investigada es resuelta en partes unidas, a partir de las cuales puede, por tanto, ser constituida o reconstituida, entendiéndose estos proceder en sus sentidos tanto material como conceptual. Es éste el principio básico de la ciencia «clásica», que puede circunscribirse de diferentes modos: resolución en encadenamientos causales aislables, búsqueda de unidades «atómicas» en los varios campos de la ciencia, etc. El progreso de la ciencia ha mostrado que estos principios clásicos, que Galileo y Descartes fueron los primeros en enunciar, tienen éxito espléndido en variadísimos campos de fenómenos.

La aplicación del procedimiento analítico depende de dos condiciones. La primera es que no existan interacciones entre «partes», o que sean tan débiles que puedan dejarse a un lado en ciertas investigaciones. Sólo con esta condición es posible «deslindar» las partes —real, lógica y matemáticamente— y luego volverlas a «juntar». La segunda condición es que las relaciones que describan

el comportamiento de partes sean lineales; sólo entonces queda satisfecha la condición de aditividad, o sea que una ecuación que describa la conducta del total tiene la misma forma que las ecuaciones que describen la conducta de las partes; los procesos parciales pueden ser superpuestos para obtener el proceso total, etc.

Semejantes condiciones no las cumplen las entidades llamadas sistemas, o sea consistentes en partes «en interacción». El prototipo de su descripción es un conjunto de ecuaciones diferenciales simultáneas (pp. 56 ss), que son no lineales en el caso general. Puede ser circunscrito un sistema o «complejidad organizada» (p. 34) merced a la existencia de «interacciones fuertes» (Rapoport, 1966) o interacciones «no triviales» (Simon, 1965), es decir, no lineales. El problema metodológico de la teoría de los sistemas, pues, es vérselas con cuestiones que, comparadas con las analítico-aditivas de la ciencia clásica, son de naturaleza más general.

Como se ha dicho, hay varios enfoques para enfrentarse a tales problemas. Esto de los «enfoques» es intencionalmente vago, pues son lógicamente no homogéneos, representan distintos modelos conceptuales, técnicas matemáticas, puntos de vista generales, etc.; concuerdan, sin embargo, en ser «teorías de sistemas». Dejando aparte procederes de la investigación aplicada —así la ingeniería de sistemas, la investigación operacional, la programación lineal y no lineal, etc.—, los enfoques más importantes son éstos. (Para un buen resumen, cf. Drischel, 1968.)

La teoría «clásica» de los sistemas aplica matemáticas clásicas, o sea el cálculo infinitesimal. Aspira a enunciar principios aplicables a sistemas en general o a subclases definidas (p. ej. sistemas cerrados y abiertos), a proporcionar técnicas para su investigación y descripción, y aplicar éstas a casos concretos. En virtud de la generalidad de tal descripción, puede afirmarse que algunas propiedades formales serán aplicables a cualquier entidad *qua* sistema (o sistema abierto, o sistema jerárquico, etc.), aun cuando sus particulares naturaleza, partes, relaciones, etc. se desconozcan o no se investiguen. Hay entre los ejemplos principios generalizados de cinética aplicables, v. gr., a poblaciones de moléculas o entidades biológicas, o sea a sistemas químicos y ecológicos; la difusión, en las ecuaciones que la definen en fisicoquímica y en la difusión de rumores; la aplicación de modelos de estado uniforme o equilibrio dinámico (*steady state*) y de mecánica estadística al tráfico (Gazis, 1967); el análisis alométrico de sistemas biológicos y sociales.



*Computerización y simulación.* Los conjuntos de ecuaciones diferenciales simultáneas como camino hacia un «modelo» o una definición de un sistema son fastidiosos de resolver, si son lineales, hasta en el caso de pocas variables; de no serlo, no pueden resolverse salvo en casos especiales (cuadro 1.1). Por esta razón las computadoras han abierto un nuevo camino en la investigación de sistemas; no sólo facilitando cálculos que de otra suerte habrían requerido tiempo y energía excesivos y reemplazando el ingenio matemático por procedimientos rutinarios, sino también abriendo campos donde no existen teorías o modos de solución matemáticos. Es posible así computerizar sistemas que van más allá de las matemáticas ordinarias; por otro lado, experimentos realmente realizados en

Cuadro 1.1

Clasificación de problemas matemáticos\* y su facilidad de solución por métodos analíticos. (Según Franks, 1967.)

Ecuación	Ecuaciones lineales			Ecuaciones no lineales		
	Una ecuación	Varias ecuaciones	Muchas ecuaciones	Una ecuación	Varias ecuaciones	Muchas ecuaciones
Algebraica	Trivial	Fácil	Casi imposible	Muy difícil	Muy difícil	Imposible
Diferenciales ordinarias	Fácil	Difícil	Casi imposible	Muy difícil	Imposible	Imposible
Diferenciales parciales	Difícil	Casi imposible	Imposible	Imposible	Imposible	Imposible

\* Cortesia de Electronic Associates, Inc.

el laboratorio pueden ser sustituidos por simulación en computadora, y el modelo alcanzado ser verificado entonces con datos experimentales. De esta forma, por ejemplo, calculó B. Hess la cadena glicolítica celular, de catorce pasos, en un modelo de más de 100 ecuaciones diferenciales no lineales. Análisis similares son cosa de rutina en economía, investigación de mercados, etc.

*Teoría de los compartimientos.* Un aspecto de los sistemas que

puede ponerse aparte, en vista de la gran sutileza que alcanza dicho campo, es la teoría de los compartimientos (Rescigno y Segre, 1966): el sistema consiste en subunidades con ciertas condiciones de frontera, entre las cuales se dan procesos de transporte. Tales sistemas de compartimientos pueden tener, pongamos por caso, estructura «catenaria» o «mamilar» (cadena de compartimientos o compartimiento central en comunicación con múltiples periféricos). Es comprensible que las dificultades matemáticas se tornen prohibitivas en el caso de sistemas de tres o más componentes. El análisis resulta posible gracias a transformaciones de Laplace y a la introducción de la teoría de las redes y las gráficas.

*Teoría de los conjuntos.* Las propiedades formales generales de sistemas, sistemas cerrados y abiertos, etc. pueden ser axiomatizadas en términos de teoría de los conjuntos (Mesarovic, 1964; Maccia, 1966). En elegancia matemática este enfoque se compara favorablemente con las formulaciones más burdas y más especiales de la teoría «clásica» de los sistemas. Los nexos entre la teoría axiomatizada de los sistemas (o sus inicios actuales) y los problemas reales de sistemas son un tanto tenues.

*Teoría de las gráficas.* Muchos problemas de sistemas conciernen a sus propiedades estructurales o topológicas antes que a relaciones cuantitativas. Se dispone de más de un acceso al respecto. La teoría de las gráficas, en especial la de las gráficas dirigidas (digráficas), elabora estructuras relacionales representándolas en un espacio topológico. Ha sido aplicada a aspectos relacionales de la biología (Rashevsky, 1956, 1960; Rosen, 1960). Matemáticamente se vincula al álgebra de matrices; por el lado de los modelos, a la teoría de los sistemas por compartimientos son subsistemas parcialmente «permeables», y desde aquí a la teoría de los sistemas abiertos.

La *teoría de las redes*, a su vez, está ligada a las teorías de los conjuntos, las gráficas, los compartimientos, etc., y se aplica a sistemas tales como las redes nerviosas (p. ej. Rapoport, 1949-1950).

La *cibernética* es una teoría de los sistemas de control basada en la comunicación (transferencia de información) entre sistema y medio circundante, y dentro del sistema, y en el control (retroalimentación) del funcionamiento del sistema en consideración al medio. Según mencionamos y volveremos a discutir, el modelo tiene extensa aplicación pero no ha de identificarse con la «teoría de los sistemas» en general. En biología y otras ciencias básicas, el

modelo cibernético conviene para describir la estructura formal de mecanismos de regulación, p. ej. mediante diagramas de bloques y de flujo. Así se logra reconocer la estructura reguladora aun cuando los genuinos mecanismos permanezcan desconocidos y sin describir, y el sistema sea una «caja negra» definida sólo por entrada y salida. Por razones parecidas, el mismo esquema cibernético puede aplicarse a sistemas hidráulicos, eléctricos, fisiológicos, etc. La compleja y sutil teoría de los servomecanismos en tecnología ha sido trasladada sólo en grado limitado a sistemas naturales (cf. Bayliss, 1966; Kalmus, 1966; Milsum, 1966).

La *teoría de la información*, en el sentido de Shannon y Weaver (1949), se basa en el concepto de información, definido por una expresión isomorfa con la entropía negativa de la termodinámica. De ahí la esperanza de que la información sirva de medida de la organización (cf. p. 42; Quastler, 1955). En tanto que la teoría de la información ganó importancia en ingeniería de comunicaciones, sus aplicaciones a la ciencia no han llegado a ser muy convincentes (E. N. Gilbert, 1966). La relación entre información y organización, teoría de la información y termodinámica, sigue siendo un problema decisivo (cf. pp. 157 ss).

La *teoría de los autómatas* (ver Minsky, 1967) es la teoría de autómatas abstractos con entrada, salida y posiblemente ensayo-error y aprendizaje. Un modelo general es la máquina de Turing (1936). Expresado en su manera más simple, un autómata de Turing es una máquina abstracta capaz de imprimir (o borrar) las marcas «1» y «0» en una cinta de longitud infinita. Es demostrable que cualquier proceso, de la complejidad que sea, puede ser simulado por una máquina, si este proceso es expresable mediante un número finito de operaciones lógicas. Todo lo que sea posible lógicamente (es decir, en un simbolismo algorítmico) también puede ser construido —en principio, aunque es claro que en modo alguno siempre en la práctica— por un autómata, o sea una máquina algorítmica.

La *teoría de los juegos* (von Neumann y Morgenstern, 1947) representa un enfoque diferente pero puede agregarse a las ciencias de sistemas por ocuparse del comportamiento de jugadores supuestamente «racionales» a fin de obtener ganancias máximas y pérdidas mínimas gracias a estrategias apropiadas contra el otro jugador (o la naturaleza). Tiene así que ver esencialmente con un «sistema» de «fuerzas» antagonicas con especificaciones.

La *teoría de la decisión* es una teoría matemática que se ocupa de elecciones entre posibilidades.

La *teoría de las cosas* se ocupa de la optimización de disposiciones en condiciones de apañamiento.

No homogénea e incompleta como es, mezclando modelos (p. ej. sistema abierto, circuito de retroalimentación) con técnicas matemáticas (p. ej. las teorías de los conjuntos, las gráficas, los juegos), semejante enumeración ayuda a mostrar que hay una serie de enfoques para investigar sistemas, incluyendo poderosos métodos matemáticos. El punto que debe reiterarse es que problemas no considerados antes, no abordables, o tenidos por extracientíficos o puramente filosóficos, van siendo explorados progresivamente.

No hay ni que decir que a menudo existe incongruencia entre modelo y realidad. Hay modelos matemáticos muy complicados y rebuscados, pero no deja de ser dudoso cómo podrán aplicarse al caso concreto; existen problemas fundamentales para los cuales no disponemos de técnicas matemáticas. Ha habido desencanto de esperanzas excesivas. La cibernética, pongamos por caso, demostró su repercusión no sólo en la tecnología sino en ciencias básicas, al proporcionar modelos para fenómenos concretos y traer fenómenos teleológicos —antes tabú— al ámbito de los problemas científicamente legítimos; mas no ofreció una explicación totalizante o gran «visión del mundo», por ser extensión más que reemplazamiento del punto de vista mecanicista y de la teoría de las máquinas (cf. Bronowski, 1964). La teoría de la información, tan desarrollada matemáticamente, resultó un chasco en psicología y sociología. La teoría de los juegos fue aplicada esperanzadamente a la guerra y la política, pero no se nota que haya conducido a mejoramiento de las decisiones políticas y del estado del mundo, fracaso no inesperado cuando se considera cuán poco se parecen las potencias a los jugadores «racionales» de la teoría de los juegos. Conceptos y modelos de equilibrio, homeostasia, ajuste, etc. convienen para el mantenimiento de sistemas, pero son inadecuados para fenómenos de cambio, diferenciación, evolución, neguentropía, producción de estados improbables, creatividad, establecimiento de tensiones, autorrealización, emergencia, etc. Ya Cannon lo advirtió al reconocer, junto a la homeostasia, una «heterostasia» que incluía fenómenos de las otras naturalezas. La teoría de los sistemas abiertos se aplica a una vasta gama de fenómenos en biología (y tecnología), pero hay que prevenir contra su expansión incauta a campos para los

cuales no son sus conceptos. Semejantes limitaciones y lagunas son de esperarse en un campo que apenas ha cumplido veinte o treinta años. En última instancia, el desencanto proviene de convertir lo que es un modelo útil hasta cierto punto en alguna realidad metafísica y en filosofía del «nada sino», como ha pasado tantas veces en la historia intelectual.

Las ventajas de los modelos matemáticos —no ambigüedad, posibilidad de deducción estricta, verificabilidad por datos observados— son bien conocidas. No quiere esto decir que modelos formulados en lenguaje ordinario hayan de ser desdeñados o rechazados.

Un *modelo verbal* es preferible a ninguno o a un modelo que, por poder ser formulado matemáticamente, es impuesto por la fuerza a la realidad y la falsifica. Teorías enormemente influyentes, como el psicoanálisis, no fueron matemáticas, o, como la teoría de la selección, su influencia llegó mucho más lejos que las construcciones matemáticas que no surgieron hasta después y cubren sólo aspectos parciales y una fracción pequeña de datos empíricos.

Las matemáticas significan esencialmente la existencia de un algoritmo mucho más preciso que el del lenguaje ordinario. La historia de la ciencia atestigua que la expresión en lenguaje ordinario a menudo precedió a la formulación matemática, a la invención de un algoritmo. Acuden en seguida ejemplos a las mentes: el paso de contar en palabras a los números romanos (semialgoritmo semiverbal y *hasto*) y a la notación arábiga con valor posicional; ecuaciones, desde la formulación verbal hasta el rudimentario simbolismo manejado con virtuosismo (aunque para nosotros difícil de seguir) por Diofanto y otros fundadores del álgebra, y de ahí a la notación moderna; teorías como las de Darwin o de la economía, que no hallaron hasta más tarde formulación matemática (parcial). Quizá valga más tener primero algún modelo no matemático, con sus limitaciones, pero que exprese algún aspecto previamente inadvertido, en espera del surgimiento venidero de algún algoritmo apropiado, que partir de modelos matemáticos prematuros que calquen algoritmos conocidos y con ello acaso restrinjan el campo visual. Muchos adelantos en biología molecular, teoría de la selección, cibernética y otros campos exhibieron los efectos cegadores de lo que Kuhn llama ciencia «normal» —esquemas conceptuales monolíticamente aceptados.

Así los modelos en lenguaje ordinario tienen su sitio en la teoría de los sistemas. La idea de sistema conserva su valor incluso

donde no puede ser formulada matemáticamente, o no deja de ser una «idea guía» en vez de ser construcción matemática. Por ejemplo, podemos carecer de conceptos de sistema satisfactorios en sociología, pero la simple apreciación de que las entidades sociales son sistemas y no sumas de átomos sociales, o de que la historia consiste en sistemas (por mal definidos que estén) llamados civilizaciones y que obedecen a principios generales de los sistemas, implica una reorientación en los campos aludidos.

Tal como puede verse por el repaso anterior, dentro del «enfoque de sistemas» hay tendencias y modelos mecanicistas y organicistas que tratan de dominar los sistemas ora por «análisis», «causalidad lineal» (incluyendo la circular), «autómatas», ora merced a «totalidad», «interacción», «dinámica» (o las palabras que se usen para circunscribir la diferencia). En tanto que estos modelos no se excluyen mutuamente y aun el mismo fenómeno sea abordable mediante diferentes modelos (conceptos «cibernéticos» o «cinéticos», p. ej.; cf. Locker, 1964), puede preguntarse qué punto de vista será el más general y fundamental. A grandes rasgos, es ésta una pregunta que hacer a la máquina de Turing como autómata general.

Una consideración oportuna (y no tratada, que sepamos, en la teoría de los autómatas) es el problema de los números «inmensos». El enunciado fundamental de la teoría de los autómatas es que los acontecimientos que pueden definirse con un número finito de «palabras» son realizables por un autómata (p. ej. una red neural formal según McCulloch y Pitts, o una máquina de Turing) (von Neumann, 1951). La cuestión reside en el calificativo de «finito». El autómata puede, por definición, realizar una serie finita de acontecimientos (por larga que sea), pero no una infinita. Pero ¿y cuándo el número de pasos requerido es «inmenso», o sea no infinito pero superior, p. ej., al número de partículas del universo (estimado del orden de  $10^{80}$ ), o al de acontecimientos posibles en el alcance temporal del universo o alguna de sus subunidades (según la propuesta de Elsasser, 1966, un número cuyo logaritmo es un número grande)? Tales números inmensos aparecen en muchos problemas de sistemas con exponenciales, factoriales y otras funciones explosivamente crecientes. Surgen incluso en sistemas con número moderado de componentes que interactúen con fuerza (en grado no desdeñable) (cf. Ashby, 1964). Para «delinearlos» en una máquina de Turing haría falta una cinta de longitud «inmensa»: que excediera no sólo a las limitaciones prácticas sino a las físicas.

Considérese, como ejemplo sencillo, una gráfica dirigida de  $N$  puntos (Rapoport, 1959b). Entre cada par puede existir o no existir una flecha (dos posibilidades). Hay así  $2^{N(N-1)}$  diferentes modos de conectar  $N$  puntos. Si  $N$  es sólo 5, hay más de un millón de maneras de conectar los puntos. Con  $N=20$ , el número de modos es superior al que se estima que hay de átomos en el universo. Problemas similares surgen, p. ej., con las conexiones posibles entre neuronas (número estimado del orden de 10 000 millones en el cerebro humano) y con el código genético (Repge, 1962). En el código (o clave) hay un mínimo de 20 (en verdad hay 64) «palabras» (tripletes de nucleótidos) que codifican los 20 aminoácidos; el código llega a contener algunos millones de unidades. Esto da  $20^{1\ 000\ 000}$  posibilidades. Imagínese que el espíritu laplaciano tuviera que hallar el valor funcional de cada combinación: habría que hacer otras tantas pruebas, pero sólo hay  $10^{80}$  átomos y organismos en el universo. Supongamos (Repge, 1962) que en la Tierra hay presentes  $10^{30}$  células en un momento determinado. Imaginando además una nueva generación celular cada minuto, con una edad del planeta de 15 000 millones de años ( $10^{16}$  minutos) habría  $10^{46}$  células en total. Para obtener sin falta un número máximo, hagamos intervenir  $10^{20}$  planetas portadores de vida. Con ello, en todo el universo no habría, de fijo, más de  $10^{66}$  seres vivos —número grande pero lejos de ser «inmenso». Pueden hacerse estimaciones con diferentes supuestos (p. ej. número de proteínas o enzimas posibles), pero los resultados son a fin de cuentas los mismos.

Por otra parte, según Hart (1959) la invención humana puede ser concebida como nuevas combinaciones de elementos previamente existentes. De ser así, la oportunidad de nuevas invenciones aumentará más o menos en función del número de posibles permutaciones y combinaciones de elementos disponibles, lo cual quiere decir que su aumento será un factorial del número de elementos. Ahora, el ritmo de aceleración del cambio social se acelera a su vez, de suerte que en muchos casos no se dará en el cambio cultural una aceleración logarítmica sino *log-log*. Hart presenta interesantes curvas que muestran cómo incrementos en velocidad humana, en áreas de mortandad por armas, en expectativas de vida, etc., siguen de hecho semejante expresión: el ritmo de crecimiento cultural no es exponencial o de interés compuesto, sino superaceleración según una curva *log-log*. De manera general, aparecerán límites

a los autómatas si la regulación en un sistema no va dirigida contra una perturbación o una cantidad limitada de éstas, sino contra perturbaciones «arbitrarias», número indefinido de situaciones que no pudieran haber sido «previstas»; esto sucede mucho en la regulación embrionaria (p. ej. los experimentos de Driesch) y neural (p. ej. los experimentos de Lashley). Aquí la regulación resulta de la interacción entre muchos componentes (cf. la discusión de Jeffries, 1951, pp. 32ss). Esto, como reconoció el propio von Neumann, se diría vinculado a las tendencias «autorrestauradoras» de los sistemas orgánicos, en contraste con los tecnológicos; expresado en términos más modernos, vinculado a su naturaleza de sistemas abiertos, no prevista ni aun en el modelo abstracto de autómatas que es la máquina de Turing.

Resulta, pues, que —según vitalistas como Driesch subrayaron hace mucho— la concepción mecanicista, inclusive tomada en la forma moderna y generalizada de un autómata de Turing, se desploma a fuerza de regulaciones después de perturbaciones «arbitrarias», y algo parecido acontece cuando el caso requiere un número de pasos «inmenso» en el sentido indicado. Aparecen problemas de realizabilidad, aun aparte de las paradojas inherentes a los conjuntos infinitos.

Las consideraciones anteriores incumben en particular a un concepto o complejo de conceptos que es de indubitable importancia para la teoría general de los sistemas: el de *orden jerárquico*. Hoy en día «vemos» el universo como una tremenda jerarquía, de las partículas elementales a los núcleos atómicos, átomos, moléculas, compuestos de molécula compleja, hasta la pléyade de estructuras (microscopía electrónica y óptica) que caen entre las moléculas y las células (Weiss, 1962b), luego células organismos y, más allá, organizaciones supraindividuales. Un esquema atractivo (aunque no el único) del orden jerárquico se debe a Boulding (cuadro 1.2.). Una jerarquía parecida surge tanto en «estructuras» como en «funciones». En última instancia, estructura (orden de partes) y función (orden de procesos) pudieran ser la mismísima cosa: en el mundo físico la materia se disuelve en un juego de energías, y en el mundo biológico las estructuras son expresión de una corriente de procesos. Actualmente, el sistema de las leyes físicas trata sobre todo del ámbito que hay entre átomos y moléculas (y su suma en la macrofísica), el cual evidentemente es una tajada de un espectro mucho más amplio. Las leyes y fuerzas de la organiza-



ción se conocen insuficientemente en los dominios subatómico y supermolecular. Hay accesos tanto al mundo subatómico (física de las altas energías) como al supermolecular (física de los compuestos de grandes moléculas), pero está claro que esto no es más que el principio. Resalta, por un lado, en la presente confusión de partículas elementales; por otro, en la actual carencia de comprensión física de las estructuras vistas al microscopio electrónico y en la ausencia de una «gramática» del código genético (cf. p. 159).

Es evidente que una teoría general del orden jerárquico será un pilar de la teoría general de los sistemas. Es posible enunciar principios de orden jerárquico en lenguaje verbal (Koestler, 1967; en prensa); hay ideas semimatemáticas (Simon, 1965) conectadas con la teoría de las matrices, y formulaciones en términos de lógica matemática (Woodger, 1930-31). En la teoría de las gráficas el orden jerárquico es expresado por el «árbol» y de esta manera llegan a ser representados aspectos relacionales de jerarquías. Pero el problema es mucho más amplio y hondo: la cuestión del orden jerárquico está íntimamente ligada a las de la diferenciación, la evolución y la medición de la organización, que no parecen expresadas como es debido ni en términos de energética (entropía negativa) ni de teoría de la información (*bits*) (cf. pp. 156 ss). A fin de cuentas, según se mencionó, el orden jerárquico y la dinámica pudieran ser lo mismo, como expuso Koestler tan bien en su símil de «The Tree and the Candle».

Hay, de este modo, una serie de modelos de sistemas, más o menos adelantados y complicados. Algunos conceptos, modelos y principios de la teoría general de los sistemas —como el orden jerárquico, la diferenciación progresiva, la retroalimentación, las características de sistemas definidas por las teorías de los conjuntos y las gráficas, etc.— son aplicables a grandes rasgos a sistemas materiales, psicológicos y socioculturales; otros, como el de sistema abierto definido por el intercambio de materia, se restringen a ciertas subclases. La práctica del análisis aplicado de sistemas muestra que habrá que aplicar diversos modelos, de acuerdo con la naturaleza del caso y con criterios operacionales.

## Cuadro 1.2

Catálogo informal de niveles principales en la jerarquía de los sistemas. (Basado parcialmente en Boulding, 1956b.)

Nivel	Descripción y ejemplos	Teoría y modelos
Estructuras estáticas	Átomos, moléculas, cristales, estructuras biológicas, del nivel microscópico electrónico al macroscópico	P. ej. fórmulas estructurales de la química; cristalografía; descripciones anatómicas
Relojería	Relojes, máquinas ordinarias en general; sistemas solares	Física ordinaria, tal como las leyes de la mecánica (newtoniana y einsteiniana) y otras
Mecanismos de control	Termostato, servomecanismos, mecanismo homeostático en los organismos	Cibernética; retroalimentación y teoría de la información
Sistemas abiertos	Llamas, células y organismos en general	(a) Expansión de la teoría física a sistemas que sostienen paso de materia (metabolismo) (b) Almacenamiento de información en el código genético (DNA) Hoy por hoy no está claro el vínculo entre (a) y (b)
Organismos inferiores	Organismos «vegetaloides»: diferenciación creciente del sistema (la llamada «división del trabajo» en el organismo); distinción entre reproducción e individuo funcional («línea germinal y soma»)	Casi no hay teoría ni modelos
Animales	Importancia creciente del tráfico en la información (evolución de receptores, sistemas nerviosos); aprendizaje; comienzos de consciencia	Comienzos en la teoría de los autómatas (relaciones S-R), retroalimentación (fenómenos regulatorios), comportamiento autónomo (oscilaciones de relajamiento), etc.
Hombre	Simbolismo; pasado y porvenir, yo y mundo, consciencia de sí, etc., como consecuencias; comunicación por lenguaje, etc.	Incipiente teoría del simbolismo

Cuadro 1-2 (continuación)

Nivel	Descripción y ejemplos	Teoría y modelos
Sistemas socio-culturales	Poblaciones de organismos (incluyendo los humanos); comunidades determinadas por símbolos (culturas)	Leyes estadísticas y posiblemente dinámicas en dinámica de poblaciones, sociología, economía, posiblemente historia Comienzos de una teoría de los sistemas culturales
Sistemas simbólicos	Lenguaje, lógica, matemáticas, ciencias, artes, moral, etc.	Algoritmos de símbolos (p. ej. matemáticas, gramática); «reglas del juego» como en artes visuales, música, etc.

*Nota:* Este repaso es impresionista e intuitivo y no aspira al rigor lógico. Por regla general, los niveles superiores presuponen los inferiores (p. ej. los fenómenos de la vida presuponen los del nivel fisicoquímico, los fenómenos socioculturales el nivel de la actividad humana, etc.), pero la relación entre niveles requiere aclaración en cada caso (cf. problemas como el del sistema abierto y el código genético como aparentes requisitos previos para la «vida», la relación entre sistemas «conceptuales» y «reales», etc.). En este sentido, la lista insinúa tanto los límites del reduccionismo como los vacíos en el conocimiento actual.

## II. El significado de la teoría general de los sistemas

### *En pos de una teoría general de los sistemas*

La ciencia moderna se caracteriza por la especialización siempre creciente, impuesta por la inmensa cantidad de datos, la complejidad de las técnicas y de las estructuras teóricas dentro de cada campo. De esta manera, la ciencia está escindida en innumerables disciplinas que sin cesar generan subdisciplinas nuevas. En consecuencia, el físico, el biólogo, el psicólogo y el científico social están, por así decirlo, encapsulados en sus universos privados, y es difícil que pasen palabras de uno de estos compartimientos a otro.

A ello, sin embargo, se opone otro notable aspecto. Al repasar la evolución de la ciencia moderna topamos con un fenómeno sorprendente: han surgido problemas y concepciones similares en campos muy distintos, independientemente.

La meta de la física clásica era a fin de cuentas resolver los fenómenos naturales en un juego de unidades elementales gobernadas por leyes «ciegas» de la naturaleza. Esto lo expresaba el ideal del espíritu laplaciano que, a partir de la posición y momento de sus partículas, puede predecir el estado del universo en cualquier momento. Esta visión mecanicista no se alteró —antes bien, se reforzó— cuando en la física las leyes deterministas fueron reemplazadas por leyes estadísticas. De acuerdo con la derivación por Boltzmann del segundo principio de la termodinámica, los acontecimientos físicos se dirigen hacia estados de máxima probabilidad, de suerte que las leyes físicas son esencialmente «leyes del desorden», fruto de acontecimientos desordenados, estadísticos. Sin

embargo, en contraste con esta visión mecanicista han aparecido en las varias ramas de la física moderna problemas de totalidad, interacción dinámica y organización. Con la relación de Heisenberg y la física cuántica se hizo imposible resolver los fenómenos en acontecimientos locales; surgen problemas de orden y organización, trátase de la estructura de los átomos, la arquitectura de las proteínas o los fenómenos de interacción en termodinámica. Parecidamente la biología, a la luz, mecanicista, veía su meta en la fragmentación de los fenómenos vitales en entidades atómicas y procesos parciales. El organismo vivo era descompuesto en células, sus actividades en procesos fisiológicos y por último fisicoquímicos, el comportamiento en reflejos condicionados y no condicionados, el sustrato de la herencia en genes discretos, y así sucesivamente. En cambio, la concepción organicista es básica para la biología moderna. Es necesario estudiar no sólo partes y procesos aislados, sino también resolver los problemas decisivos hallados en la organización y el orden que los unifican, resultantes de la interacción dinámica de partes y que hacen el diferente comportamiento de éstas cuando se estudian aisladas o dentro del todo. Propensiones parecidas se manifestaron en psicología. En tanto que la clásica psicología de la asociación trataba de resolver fenómenos mentales en unidades elementales —átomos psicológicos se diría—, tales como sensaciones elementales, la psicología de la *Gestalt* reveló la existencia y la primacía de todos psicológicos que no son sumas de unidades elementales y que están gobernados por leyes dinámicas. Finalmente, en las ciencias sociales el concepto de sociedad como suma de individuos a modo de átomos sociales —el modelo del hombre económico— fue sustituido por la inclinación a considerar la sociedad, la economía, la nación, como un todo superordinado a sus partes. Esto trae consigo los grandes problemas de la economía planeada o la deificación de la nación y el Estado, pero también refleja nuevos modos de pensar.

Este paralelismo de principios cognoscitivos generales en diferentes campos es aun más impresionante cuando se tiene en cuenta que se dieron independientemente, sin que casi nunca interviniera nada de la labor e indagación en campos aparte.

Hay otro aspecto importante de la ciencia moderna. Hasta no hace mucho la ciencia exacta, el *corpus* de las leyes de la naturaleza, coincidía casi del todo en la física teórica. Pocos intentos de enunciar leyes exactas en terrenos no físicos han merecido reconocimiento.

No obstante, la repercusión y el progreso de las ciencias biológicas, de la conducta y sociales parecerían imponer un ensanchamiento de nuestros esquemas conceptuales a fin de dar cabida a sistemas de leyes en campos donde no es suficiente o posible la aplicación de la física.

Semejante inclinación hacia teorías generalizadas es patente en muchos campos y de diversas maneras. Partiendo de la labor precursora de Lotka y Volterra, p. ej., se ha desarrollado una compleja teoría de la dinámica de las poblaciones, la lucha por la existencia y los equilibrios biológicos. La teoría opera con nociones biológicas tales como individuo, especie, coeficientes de competencia y demás. Un procedimiento parecido se aplica en economía cuantitativa y econometría. Los modelos y familias de ecuaciones aplicadas en esta última se asemejan a los de Lotka o, por decirlo todo, a los de la cinética química, pero el modelo de entidades y fuerzas interactuantes ocupa otro nivel. Por tomar otro ejemplo: los organismos vivos son en el fondo sistemas abiertos, es decir, sistemas que intercambian materia con el medio circundante. La física y la fisicoquímica ordinarias se ocupan de sistemas cerrados, y apenas en años recientes ha sido ampliada la teoría para incluir procesos irreversibles, sistemas abiertos y estados de desequilibrio. Sin embargo, si deseamos aplicar el modelo de los sistemas abiertos —digamos— a los fenómenos del crecimiento animal, automáticamente llegamos a una generalización de la teoría, referente no ya a unidades físicas sino biológicas. En otras palabras, estamos ante sistemas generalizados. Lo mismo pasa en los campos de la cibernética y la teoría de la información, que han merecido tanto interés en los pasados años.

Así, existen modelos, principios y leyes aplicables a sistemas generalizados o a sus subclases, sin importar su particular género, la naturaleza de sus elementos componentes y las relaciones o «fuerzas» que imperen entre ellos. Parece legítimo pedir una teoría no ya de sistemas de clase más o menos especial, sino de principios universales aplicables a los sistemas en general.

De aquí que adelantemos una nueva disciplina llamada *Teoría general de los sistemas*. Su tema es la formulación y derivación de aquellos principios que son válidos para los «sistemas» en general.

El sentido de esta disciplina puede ser circunscrito como sigue. La física se ocupa de sistemas de diferentes niveles de generalidad. Se dilata desde sistemas bastante especiales —como los que aplica

el ingeniero a la construcción de un puente o una máquina— hasta leyes especiales de disciplinas físicas como la mecánica o la óptica, y hasta leyes de gran generalidad, como los principios de la termodinámica, aplicables a sistemas de naturaleza intrínsecamente diferente —mecánicos, calóricos, químicos o lo que sean. Nada prescribe que tengamos que desembocar en los sistemas tradicionalmente tratados por la física. Podemos muy bien buscar principios aplicables a sistemas en general, sin importar que sean de naturaleza física, biológica o sociológica. Si planteamos esto y definimos bien el sistema, hallaremos que existen modelos, principios y leyes que se aplican a sistemas generalizados, sin importar su particular género, elementos y «fuerzas» participantes.

Consecuencia de la existencia de propiedades generales de sistemas es la aparición de similitudes estructurales o isomorfismos en diferentes campos. Hay correspondencias entre los principios que rigen el comportamiento de entidades que son intrínsecamente muy distintas. Por tomar un ejemplo sencillo, se puede aplicar una ley exponencial de crecimiento a ciertas células bacterianas, a poblaciones de bacterias, de animales o de humanos, y al progreso de la investigación científica medida por el número de publicaciones de genética o de ciencia en general. Las entidades en cuestión, bacterias, animales, gente, libros, etc., son completamente diferentes, y otro tanto ocurre con los mecanismos causales en cuestión. No obstante, la ley matemática es la misma. O tómense los sistemas de ecuaciones que describen la competencia entre especies animales y vegetales en la naturaleza. Se da el caso de que iguales sistemas de ecuaciones se aplican en ciertos campos de la fisicoquímica y de la economía. Esta correspondencia se debe a que las entidades consideradas pueden verse, en ciertos aspectos, como «sistemas», o sea complejos de elementos en interacción. Que los campos mencionados, y otros más, se ocupen de «sistemas», es cosa que acarrea correspondencia entre principios generales y hasta entre leyes especiales, cuando se corresponden las condiciones en los fenómenos considerados.

Conceptos, modelos y leyes parecidos surgen una y otra vez en campos muy diversos, independientemente y fundándose en hechos del todo distintos. En muchas ocasiones fueron descubiertos principios idénticos, porque quienes trabajan en un territorio no se percataban de que la estructura teórica requerida estaba ya muy adelantada en algún otro campo. La teoría general de los

sistemas contará mucho en el afán de evitar esa inútil repetición de esfuerzos.

También aparecen isomorfismos de sistemas en problemas recalitrantes al análisis cuantitativo pero, con todo, de gran interés intrínseco. Hay, p. ej., isomorfismos entre sistemas biológicos y «epiorganismos» (Gerard), como las comunidades animales y las sociedades humanas. ¿Qué principios son comunes a los varios niveles de organización y pueden, así, ser trasladados de un nivel a otro, y cuáles son específicos, de suerte que su traslado conduzca a falacias peligrosas? ¿Pueden las sociedades y civilizaciones ser consideradas como sistemas?

Se diría, entonces, que una teoría general de los sistemas sería un instrumento útil al dar, por una parte, modelos utilizables y transferibles entre diferentes campos, y evitar, por otra, vagas analogías que a menudo han perjudicado el progreso en dichos campos.

Hay, sin embargo, otro aspecto aun más importante de la teoría general de los sistemas. Puede parafrasearse mediante una feliz formulación debida al bien conocido matemático y fundador de la teoría de la información, Warren Weaver. La física clásica, dijo éste, tuvo gran éxito al desarrollar la teoría de la complejidad no organizada. Por ej., el comportamiento de un gas es el resultado de los movimientos desorganizados, e imposibles de seguir aisladamente, de innumerables moléculas; en conjunto, lo rigen las leyes de la termodinámica. La teoría de la complejidad no organizada se arraiga a fin de cuentas en las leyes del azar y la probabilidad y en la segunda ley de la termodinámica. En contraste, hoy el problema fundamental es el de la complejidad organizada. Conceptos como los de organización, totalidad, directividad, teleología y diferenciación son ajenos a la física habitual. Sin embargo, asoman a cada paso en las ciencias biológicas, del comportamiento y sociales, y son de veras indispensables para vérselas con organismos vivientes o grupos sociales. De esta manera, un problema fundamental planteado a la ciencia moderna es el de una teoría general de la organización. La teoría general de los sistemas es capaz en principio de dar definiciones exactas de semejantes conceptos y, en casos apropiados, de someterlos a análisis cuantitativo.

Hemos indicado brevemente el sentido de la teoría general de los sistemas, y ayudará a evitar malos entendidos señalar ahora lo que no es. Se ha objetado que la teoría de los sistemas no quiere decir nada más que el hecho trivial de que matemáticas



de alguna clase son aplicables a diferentes clases de problemas. Por ej., la ley del crecimiento exponencial es aplicable a muy diferentes fenómenos, desde la desintegración radiactiva hasta la extinción de poblaciones humanas con insuficiente reproducción. Así es, sin embargo, porque la fórmula es una de las más sencillas ecuaciones diferenciales y por ello se puede aplicar a cosas muy diferentes. O sea que si se presentan las llamadas leyes isomorfas del crecimiento en muy diversos procesos, no es esto más significativo que el hecho de que la aritmética elemental sea aplicable a todos los objetos contables, que 2 y 2 sean 4, sin importar que se trate de manzanas, átomos o galaxias.

La respuesta es la siguiente. No sólo en el ejemplo citado como simple ilustración, sino en el desenvolvimiento de la teoría de los sistemas, la cuestión no es la aplicación de expresiones matemáticas bien conocidas. Antes bien, son planteados problemas novedosos y que en parte parecen lejos de estar resueltos. Según mencionamos, el método de la ciencia clásica era de lo más apropiado para fenómenos que pueden descomponerse en cadenas causales aisladas o que son consecuencia estadística de un número «infinito» de procesos aleatorios, como pasa con la mecánica estadística, el segundo principio de la termodinámica y todas las leyes que de él emanan. Sin embargo, los modos clásicos de pensamiento fracasan en el caso de la interacción entre un número grande, pero limitado, de elementos o procesos. Aquí surgen los problemas circunscritos por nociones como las de totalidad, organización y demás, que requieren nuevos modos de pensamiento matemático.

Otra objeción hace hincapié en el peligro de que la teoría general de los sistemas desemboque en analogías sin sentido. Este riesgo existe, en efecto. Así, es una idea difundida considerar el Estado o la nación como organismo en un nivel superordinado. Pero semejante teoría constituiría el fundamento de un Estado totalitario, dentro del cual el individuo humano aparece como célula insignificante de un organismo o como obrera intrascendente en una colmena.

La teoría general de los sistemas no persigue analogías vagas y superficiales. Poco valen, ya que junto a las similitudes entre fenómenos siempre se hallan también diferencias. El isomorfismo que discutimos es más que mera analogía. Es consecuencia del hecho de que, en ciertos aspectos, puedan aplicarse abstracciones y modelos conceptuales coincidentes a fenómenos diferentes. Sólo se aplicarán

las leyes de sistemas con mira a tales aspectos. Esto no difiere del procedimiento general en la ciencia. Es una situación como la que se puede dar cuando la ley de la gravitación se aplica a la manzana de Newton, el sistema planetario y los fenómenos de las mareas. Quiere decir que de acuerdo con ciertos aspectos limitados, un sistema teórico, el de la mecánica, es válido; no se pretende que haya particular semejanza entre las manzanas, los planetas y los océanos desde otros muchos puntos de vista.

Una objeción más pretende que la teoría de los sistemas carece de valor explicativo. Por ej., algunos aspectos de la intencionalidad orgánica, como lo que se llama equifinalidad de los procesos del desarrollo (p. 40), son susceptibles de interpretación con la teoría de los sistemas. Sin embargo, hoy por hoy nadie está en condiciones de definir en detalle los procesos que llevan de un cigoto animal a un organismo, con su miriada de células, órganos y funciones muy complicadas.

Consideraremos aquí que hay grados en la explicación científica, y que en campos complejos y teóricamente poco desarrollados tenemos que conformarnos con lo que el economista Hayek llamó con justicia «explicación en principio». Un ejemplo indicará el sentido de esto.

La economía teórica es un sistema altamente adelantado que suministra complicados modelos para los procesos en cuestión. Sin embargo, por regla general los profesores de economía no son millonarios. Dicho de otra manera, saben explicar bien los fenómenos económicos «en principio», pero no llegan a predecir fluctuaciones de la bolsa con respecto a determinadas participaciones o fechas. Con todo, la explicación en principio es mejor que la falta de explicación. Si se consigue insertar los parámetros necesarios, la explicación «en principio» en términos de teoría de los sistemas pasa a ser una teoría análoga en estructura a las de la física.

### *Metas de la teoría general de los sistemas*

Tales consideraciones se resumen así.

En varias disciplinas de la ciencia moderna han ido surgiendo concepciones y puntos de vista generales semejantes. En tanto que antes la ciencia trataba de explicar los fenómenos observables reduciéndolos al juego de unidades elementales investigables independientemente una de otra, en la ciencia contemporánea aparecen actitudes

que se ocupan de lo que un tanto vagamente se llama «totalidad», es decir, problemas de organización, fenómenos no descomponibles en acontecimientos locales, interacciones dinámicas manifiestas en la diferencia de conducta de partes aisladas o en una configuración superior, etc.; en una palabra, «sistemas» de varios órdenes, no comprensibles por investigación de sus respectivas partes aisladas. Concepciones y problemas de tal naturaleza han aparecido en todas las ramas de la ciencia, sin importar que el objeto de estudio sean cosas inanimadas, organismos vivientes o fenómenos sociales. Esta correspondencia es más llamativa en vista de que cada ciencia siguió su curso independiente, casi sin contacto con las demás y basándose todas en hechos diferentes y filosofías contradictorias. Esto indica un cambio general en la actitud y las concepciones científicas.

No sólo se parecen aspectos y puntos de vista generales en diferentes ciencias; con frecuencia hallamos leyes formalmente idénticas o isomorfas en diferentes campos. En muchos casos, leyes isomorfas valen para determinadas clases o subclases de «sistemas», sin importar la naturaleza de las entidades envueltas. Parece que existen leyes generales de sistemas aplicables a cualquier sistema de determinado tipo, sin importar las propiedades particulares del sistema ni de los elementos participantes.

Estas consideraciones conducen a proponer una nueva disciplina científica, que llamamos teoría general de los sistemas. Su tema es la formulación de principios válidos para «sistemas» en general, sea cual fuere la naturaleza de sus elementos componentes y las relaciones o «fuerzas» reinantes entre ellos.

De esta suerte, la teoría general de los sistemas es una ciencia general de la «totalidad», concepto tenido hasta hace poco por vago, nebuloso y semimetafísico. En forma elaborada sería una disciplina lógico-matemática, puramente formal en sí misma pero aplicable a las varias ciencias empíricas. Para las ciencias que se ocupan de «todos organizados», tendría significación análoga a la que disfrutó la teoría de la probabilidad para ciencias que se las ven con «acontecimientos aleatorios»; la probabilidad es también una disciplina matemática formal aplicable a campos de lo más diverso, como la termodinámica, la experimentación biológica y médica, la genética, las estadísticas para seguros de vida, etc.

Esto pone de manifiesto las metas principales de la teoría general de los sistemas:

(1) Hay una tendencia general hacia la integración en las varias ciencias, naturales y sociales.

(2) Tal integración parece girar en torno a una teoría general de los sistemas.

(3) Tal teoría pudiera ser un recurso importante para buscar una teoría exacta en los campos no físicos de la ciencia.

(4) Al elaborar principios unificadores que corren «verticalmente» por el universo de las ciencias, esta teoría nos acerca a la meta de la unidad de la ciencia.

(5) Esto puede conducir a una integración, que hace mucha falta, en la instrucción científica.

Es oportuna una observación acerca de la delimitación de la teoría aquí discutida. El nombre y el programa de una teoría general de los sistemas los introdujo quien esto escribe hace ya años. Resultó, sin embargo, que no pocos investigadores de varios campos habían llegado a conclusiones y enfoques similares. Se propone, pues, conservar el nombre, que va imponiéndose en el uso general, aunque fuera sólo como rótulo conveniente.

De buenas a primeras, da la impresión de que la definición de sistemas como «conjuntos de elementos en interacción» fuera tan general y vaga que no hubiera gran cosa que aprender de ella. No es así. Por ej., pueden definirse sistemas merced a ciertas familias de ecuaciones diferenciales, y si, como es costumbre en el razonamiento matemático, se introducen condiciones más específicas, aparecen muchas propiedades importantes de los sistemas en general y de casos más especiales (cf. capítulo III).

El enfoque matemático adoptado en la teoría general de los sistemas no es el único posible ni el más general. Hay otra serie de enfoques modernos afines, tales como la teoría de la información, la cibernética, las teorías de los juegos, la decisión y las redes, los modelos estocásticos, la investigación de operaciones —por sólo mencionar los más importantes—; sin embargo, el hecho de que las ecuaciones diferenciales cubran vastas áreas en las ciencias físicas, biológicas, económicas, y probablemente también las ciencias del comportamiento, las hace vía apropiada de acceso al estudio de los sistemas generalizados.

Pasaré a ilustrar la teoría general de los sistemas con algunos ejemplos.

*Sistemas cerrados y abiertos: limitaciones de la física ordinaria*

Mi primer ejemplo será el de los sistemas cerrados y abiertos. La física ordinaria sólo se ocupa de sistemas cerrados, de sistemas que se consideran aislados del medio circundante. Así, la fisicoquímica nos habla de las reacciones, de sus velocidades, y de los equilibrios químicos que acaban por establecerse en un recipiente cerrado donde se mezclan cierto número de sustancias reaccionantes. La termodinámica declara expresamente que sus leyes sólo se aplican a sistemas cerrados. En particular, el segundo principio afirma que, en un sistema cerrado, cierta magnitud, la entropía, debe aumentar hasta el máximo, y el proceso acabará por detenerse en un estado de equilibrio. Puede formularse el segundo principio de diferentes modos, según uno de los cuales la entropía es medida de probabilidad, y así un sistema cerrado tiende al estado de distribución más probable. Sin embargo, la distribución más probable de una mezcla —digamos— de cuentas de vidrio rojas y azules, o de moléculas dotadas de velocidades diferentes, es un estado de completo desorden; todas las cuentas rojas por un lado y todas las azules por otro, o bien, en un espacio cerrado, todas las moléculas veloces —o sea de alta temperatura— a la derecha, y todas las lentas —baja temperatura— a la izquierda, son estados de cosas altamente improbables. O sea que la tendencia hacia la máxima entropía o la distribución más probable es la tendencia al máximo desorden.

Sin embargo, encontramos sistemas que, por su misma naturaleza y definición, no son sistemas cerrados. Todo organismo viviente es ante todo un sistema abierto. Se mantiene en continua incorporación y eliminación de materia, constituyendo y demoliendo componentes, sin alcanzar, mientras la vida dure, un estado de equilibrio químico y termodinámico, sino manteniéndose en un estado llamado uniforme (*steady*) que difiere de aquél. Tal es la esencia misma de ese fenómeno fundamental de la vida llamado metabolismo, los procesos químicos dentro de las células vivas. ¿Y entonces? Es obvio que las formulaciones habituales de la física no son en principio aplicables al organismo vivo *qua* sistema abierto y en estado uniforme, y bien podemos sospechar que muchas características de los sistemas vivos que resultan paradójicas vistas según las leyes de la física son consecuencia de este hecho.

No ha sido sino hasta años recientes cuando hemos presenciado una expansión de la física orientada a la inclusión de sistemas

abiertos. Esta teoría ha aclarado muchos fenómenos oscuros en física y biología, y ha conducido asimismo a importantes conclusiones generales, de las cuales sólo mencionaré dos.

La primera es el principio de equifinalidad. En cualquier sistema cerrado, el estado final está inequívocamente determinado por las condiciones iniciales: p. ej., el movimiento en un sistema planetario, donde las posiciones de los planetas en un tiempo  $t$  están inequívocamente determinadas por sus posiciones en un tiempo  $t_0$ . O, en un equilibrio químico, las concentraciones finales de los compuestos reaccionantes depende naturalmente de las concentraciones iniciales. Si se alteran las condiciones iniciales o el proceso, el estado final cambiará también. No ocurre lo mismo en los sistemas abiertos. En ellos puede alcanzarse el mismo estado final partiendo de diferentes condiciones iniciales y por diferentes caminos. Es lo que se llama equifinalidad, y tiene significación para los fenómenos de la regulación biológica. Quienes estén familiarizados con la historia de la biología recordarán que fue precisamente la equifinalidad la que llevó al biólogo alemán Driesch a abrazar el vitalismo, o sea la doctrina de que los fenómenos vitales son inexplicables en términos de la ciencia natural. La argumentación de Driesch se basaba en experimentos acerca de embriones tempranos. El mismo resultado final —un organismo normal de erizo de mar— puede proceder de un cigoto completo, de cada mitad de un cigoto de éstos, o del producto de fusión de dos cigotos. Lo mismo vale para embriones de otras muchas especies; incluyendo el hombre, donde los gemelos idénticos provienen de la escisión de un cigoto. La equifinalidad, de acuerdo con Driesch, contradice las leyes de la física y sólo puede deberse a un factor vitalista animoide que gobierne los procesos previendo la meta: el organismo normal por constituir. Sin embargo, puede demostrarse que los sistemas abiertos, en tanto alcancen un estado uniforme, deben exhibir equifinalidad, con lo cual desaparece la supuesta violación de las leyes físicas (cf. pp. 136 s).

Otro aparente contraste entre la naturaleza inanimada y la animada es lo que fue descrito a veces como violenta contradicción entre la degradación kelviniana y la evolución darwiniana, entre la ley de la disipación en física y la ley de la evolución en biología. De acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, la tendencia general de los acontecimientos en la naturaleza física apunta a estados de máximo desorden y a la igualación de diferencias,

con la llamada muerte térmica del universo como perspectiva final, cuando toda la energía quede degradada como calor uniformemente distribuido a baja temperatura, y los procesos del universo se paren. En contraste, el mundo vivo exhibe, en el desarrollo embrionario y en la evolución, una transición hacia un orden superior, heterogeneidad y organización. Pero, sobre la base de la teoría de los sistemas abiertos, la aparente contradicción entre entropía y evolución desaparece. En todos los procesos irreversibles la entropía debe aumentar. Por tanto, el cambio de entropía en sistemas cerrados es siempre positivo; hay continua destrucción de orden. En los sistemas abiertos, sin embargo, no sólo tenemos producción de entropía debida a procesos irreversibles, sino también entrada de entropía que bien puede ser negativa. Tal es el caso en el organismo vivo, que importa complejas moléculas ricas en energía libre. Así, los sistemas vivos, manteniéndose en estado uniforme, logran evitar el aumento de entropía y hasta pueden desarrollarse hacia estados de orden y organización crecientes.

A partir de estos ejemplos es de imaginarse el alcance de la teoría de los sistemas abiertos. Entre otras cosas, muestra que muchas supuestas violaciones de leyes físicas en la naturaleza no existen o, mejor dicho, que no se presentan al generalizar la teoría física. En una versión generalizada, el concepto de sistemas abiertos puede ser aplicado a niveles no físicos. Son ejemplos su uso en ecología, y la evolución hacia la formación de climax (Whittaker); en psicología, donde los «sistemas neurológicos» se han considerado «estructuras dinámicas abiertas» (Krech); en filosofía, donde la tendencia hacia puntos de vista «trans-accionales» opuestos a los «auto-accionales» e «inter-accionales» corresponde de cerca al modelo de sistema abierto (Bentley).

### *Información y entropía*

Otra vía que está vinculada de cerca a la teoría de los sistemas es la moderna teoría de la comunicación. Se ha dicho a menudo que la energía es la moneda de la física, como pasa con los valores económicos, expresados en dólares o pesos. Hay, sin embargo, algunos campos de la física y la tecnología donde esta moneda no es muy aceptable. Tal ocurre en el campo de la comunicación, el cual, en vista de la multiplicación de teléfonos, radios, radares,

máquinas computadoras, servomecanismos y otros artefactos, ha hecho nacer una nueva rama de la física.

La noción general en teoría de la comunicación es la de información. En muchos casos la corriente de información corresponde a una corriente de energía; p. ej., si ondas luminosas emitidas por algunos objetos llegan al ojo o a una celdá fotoeléctrica, provocan alguna reacción del organismo o actúan sobre una máquina, y así portan información. Es fácil, sin embargo, dar ejemplos en los cuales la información fluye en sentido opuesto a la energía, o en los que es transmitida información sin que corran energía o materia. El primer caso se da en un cable telegráfico, por el que va corriente en una dirección, pero es posible enviar información, un mensaje, en una u otra dirección, interrumpiendo la corriente en un punto y registrando la interrupción en otro. A propósito del segundo caso, piénsese en las puertas automáticas con sistema fotoeléctrico: la sombra, la suspensión de la energía luminosa, informa a la celda de que alguien entra, y la puerta se abre. De modo que la información, en general, no es expresable en términos de energía.

Hay, sin embargo, otra manera de medir la información, a saber: en términos de decisiones. Tomemos el juego de las veinte preguntas, en el cual hay que averiguar de qué objeto se trata, respondiendo sólo «sí» o «no». La cantidad de información transmitida en una respuesta representa una decisión entre dos posibilidades, p. ej., «animal» o «no animal». Con dos preguntas es posible decidir entre cuatro posibilidades, p. e., «mamífero»—«no mamífero», o «planta con flores»—«planta sin flores». Con tres respuestas se trata de una decisión entre ocho, etc. Así, el logaritmo de base 2 de las decisiones posibles puede ser usado como medida de información, siendo la unidad la llamada unidad binaria o *bit*. La información contenida en dos respuestas es  $\log_2 4 = 2$  bits, en tres respuestas,  $\log_2 8 = 3$  bits, etc. Esta medida de la información resulta ser similar a la de la entropía, o más a la de la entropía negativa, puesto que la entropía es definida como logaritmo de la probabilidad. Pero la entropía, como ya sabemos, es una medida del desorden; de ahí que la entropía negativa o información sea una medida del orden o de la organización, ya que la última, en comparación con la distribución al azar, es un estado improbable.



Otro concepto céntrico de la teoría de la comunicación y el control es el de retroalimentación. El siguiente es un esquema sencillo de retroalimentación (Fig. 2.1). El sistema comprende, primero, un receptor u «órgano sensorio», ya sea una celda fotoeléctrica, una pantalla de radar, un termómetro o un órgano sensorio en sentido biológico. En los dispositivos tecnológicos, el mensaje puede ser una corriente débil; o en un organismo vivo estar representado por la conducción nerviosa, etc.

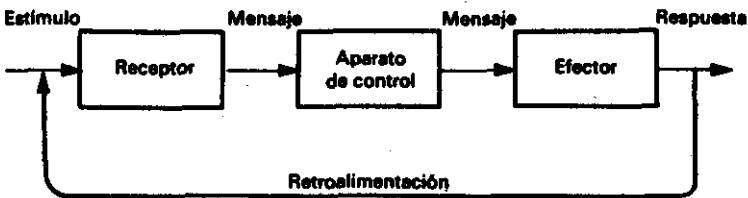


Fig. 2.1. Esquema sencillo de retroalimentación.

Hay luego un centro que recombina los mensajes que llegan y los transmite a un efector, consistente en una máquina como un electromotor, un carrete de calentamiento o solenoide, o un músculo que responde al mensaje que llega, de tal manera que haya considerable emisión de energía. Por último, el funcionamiento del efector está empalmado al receptor, lo cual hace que el sistema se autorregule, o sea que garantiza la estabilización o la dirección de acción.

Los dispositivos de retroalimentación se emplean mucho en la tecnología moderna para estabilizar determinada acción, como en los termostatos o los receptores de radio, o la dirección de acciones hacia determinada meta: las desviaciones se retroalimentan, como información, hasta que se alcanza la meta o el blanco. Tal es el caso de los proyectiles autodirigidos que buscan el blanco, de los sistemas de control de cañones antiaéreos, de los sistemas de pilotaje de buques y de otros de los llamados servomecanismos.

Hay, por cierto, gran número de fenómenos biológicos que corresponden al modelo de retroalimentación. Está, primero, lo que se llama homeostasia, o mantenimiento del equilibrio en el organismo vivo, cuyo prototipo es la termorregulación en los animales de sangre caliente. El enfriamiento de la sangre estimula ciertos centros cerebrales que «echan a andar» los mecanismos productores

de calor del cuerpo, y la temperatura de éste es registrada a su vez por aquellos centros, de manera que la temperatura es mantenida a nivel constante. Existen en el cuerpo mecanismos homeostáticos análogos que preservan la constancia de gran número de variables fisicoquímicas. Además, en el organismo humano y animal existen sistemas de retroalimentación comparables a los servomecanismos de la tecnología, que se encargan de la regulación de acciones. Si queremos alcanzar un lápiz, se envía al sistema nervioso central un informe acerca de la distancia que nos impidió llegar al lápiz en el primer intento; esta información es retroalimentada al sistema nervioso central para que el movimiento sea controlado hasta que se logre la meta.

Gran variedad de sistemas tecnológicos y de la naturaleza viviente siguen, pues, el esquema de retroalimentación, y es bien sabido que Norbert Wiener creó una nueva disciplina, llamada cibernética, para tratar estos fenómenos. La teoría aspira a mostrar que mecanismos de naturaleza retroalimentadora fundamentan el comportamiento teleológico o intencionado en las máquinas construidas por el hombre, así como en los organismos vivos y en los sistemas sociales.

Hay que tener presente, sin embargo, que el esquema de retroalimentación es de naturaleza bastante especial. Presupone disposiciones estructurales del tipo mencionado. Pero hay muchas regulaciones en el organismo vivo que tienen naturaleza del todo distinta, a saber, aquellos en que se alcanza el orden por interacción dinámica de procesos. Recuérdense, p. ej., las regulaciones embrionarias, que restablecen el todo a partir de las partes en procesos equifinales. Puede demostrarse que las regulaciones *primarias* en los sistemas orgánicos, o sea aquellas que son más fundamentales y primitivas en el desarrollo embrionario así como en la evolución, residen en la interacción dinámica. Se basan en el hecho de que el organismo vivo sea un sistema abierto que se mantiene en estado uniforme o se acerca a él. Superpuestas están las regulaciones que podemos llamar *secundarias* y que son controladas por disposiciones fijas, especialmente del tipo de la retroalimentación. Esta situación es consecuencia de un principio general de organización que podría llamarse mecanización progresiva. Al principio los sistemas —biológicos, neurológicos, psicológicos o sociales— están gobernados por interacción dinámica entre sus componentes; más tarde se establecen disposiciones fijas y condiciones de restricción que hacen más eficiente el sistema y sus partes, pero, de paso, disminuyen gradualmente

su equipotencialidad hasta acabar por abolirla. De modo que la dinámica es el aspecto más amplio, ya que siempre es posible llegar, por leyes generales de sistemas, hasta la función como de máquina, imponiendo condiciones adecuadas de restricción, pero no es posible lo contrario.

### *Causalidad y teleología*

Otro punto que desearía mencionar es el cambio en la imagen científica del mundo durante las últimas décadas. En el punto de vista llamado mecanicista, nacido de la física clásica del siglo XIX, el juego sin concierto de los átomos, regidos por las leyes inexorables de la causalidad, generaba todos los fenómenos del mundo, inanimado, viviente y mental. No quedaba lugar para ninguna direccionalidad, orden o *telos*. El mundo de los organismos aparecía como producto del azar, amasado por el juego sin sentido de mutaciones azarosas y selección; el mundo mental como un epifenómeno curioso y bastante inconsecuente de los acontecimientos materiales.

La única meta de la ciencia parecía ser analítica: la división de la realidad en unidades cada vez menores y el aislamiento de líneas causales separadas. Así, la realidad física era descompuesta en puntos de masa o átomos, el organismo vivo en células, el comportamiento en reflejos, la percepción en sensaciones puntuales, etc. En correspondencia, la causalidad tenía esencialmente un sentido: nuestro sol atrae a un planeta en la mecánica newtoniana, un gene en el óvulo fertilizado responde de tal o cual carácter heredado, una clase de bacteria produce tal o cual enfermedad, los elementos mentales están alineados, como las cuentas de un collar, por la ley de la asociación. Recuérdese la famosa tabla de las categorías kantianas, que intenta sistematizar las nociones fundamentales de la ciencia clásica: es sintomático que nociones de interacción y de organización figurasen sólo para llenar huecos, o no apareciesen de plano.

Puede tomarse como característica de la ciencia moderna el que este esquema de unidades aislables actuantes según causalidad unidireccional haya resultado insuficiente. De ahí la aparición, en todos los campos de la ciencia, de nociones como las de totalidad, holismo, organismo, *Gestalt*, etc., que vienen a significar todas que, en última instancia, debemos pensar en términos de sistemas de elementos en interacción mutua.

Análogamente, las nociones de teleología y directividad parecían caer fuera del alcance de la ciencia y ser escenario de misteriosos agentes sobrenaturales o antropomorfos —o bien tratarse de un seudoproblema, intrínsecamente ajeno a la ciencia, mera proyección mal puesta de la mente del observador en una naturaleza gobernada por leyes sin propósito. Con todo, tales aspectos existen, y, no puede concebirse un organismo vivo —no se diga el comportamiento y la sociedad humanos— sin tener en cuenta lo que, variada y bastante vagamente, se llama adaptabilidad, intencionalidad, persecución de metas y cosas semejantes.

Característico del presente punto de vista es que estos aspectos sean tomados en serio, como problemas legítimos para la ciencia; y también estamos en condiciones de procurar modelos que simulen tal comportamiento.

Ya han sido mencionados dos de ellos. Uno es la equifinalidad, la tendencia a un estado final característico a partir de diferentes estados iniciales y por diferentes caminos, fundada en interacción dinámica en un sistema abierto que alcanza un estado uniforme; otro, la retroalimentación, el mantenimiento homeostático de un estado característico o la búsqueda de una meta, basada en cadenas causales circulares y en mecanismos que devuelven información acerca de desviaciones con respecto al estado por mantener o la meta por alcanzar. Otro modelo de comportamiento adaptativo, un «diseño para un cerebro», es creación de Ashby, quien partió, dicho sea de paso, de las mismas definiciones y ecuaciones matemáticas para un sistema general que había usado el presente autor. Ambos llevaron adelante sus sistemas independientemente y, siguiendo diferentes intereses, arribaron a distintos teoremas y conclusiones. El modelo de la adaptabilidad de Ashby es, a grandes rasgos, el de funciones escalonadas que definen un sistema, funciones, pues, que al atravesar cierto valor crítico, saltan a una nueva familia de ecuaciones diferenciales. Esto significa que, habiendo pasado un estado crítico, el sistema emprende un nuevo modo de comportamiento. Así, por medio de funciones escalonadas, el sistema exhibe comportamiento adaptativo según lo que el biólogo llamaría ensayo y error: prueba diferentes caminos y medios, y a fin de cuentas se asienta en un terreno donde ya no entre en conflicto con valores críticos del medio circundante. Ashby incluso construyó una máquina electromagnética, el homeóstato, que representa un sistema así, que se adapta por ensayo y error.

No voy a discutir los méritos y limitaciones de estos modelos de comportamiento teleológico o dirigido. Lo que sí debe ser subrayado es el hecho de que el comportamiento teleológico dirigido hacia un estado final o meta característicos no sea algo que esté más allá de las lindes de la ciencia natural, ni una errada concepción antropomorfa de procesos que, en sí mismos, no tienen dirección y son accidentales. Más bien es una forma de comportamiento definible en términos científicos y cuyas condiciones necesarias y mecanismos posibles pueden ser indicados

### *¿Qué es organización?*

Consideraciones análogas son aplicables al concepto de organización. También ella era ajena al mundo mecanicista. El problema no se presentó en física clásica, en mecánica, electrodinámica, etc. Más aun, el segundo principio de la termodinámica apuntaba a la destrucción del orden como dirección general de los acontecimientos. Verdad es que las cosas son distintas en la física moderna. Un átomo, un cristal, una molécula, son organizaciones, como Whitehead no se cansaba de subrayar. En biología, los organismos son, por definición, cosas organizadas. Pero aunque dispongamos de una enorme cantidad de datos sobre la organización biológica, de la bioquímica y la citología a la histología y la anatomía; carecemos de una teoría de la organización biológica, de un modelo conceptual que permita explicar los hechos empíricos.

Características de la organización, trátase de un organismo vivo o de una sociedad, son nociones como las de totalidad, crecimiento, diferenciación, orden jerárquico, dominancia, control, competencia, etcétera.

Semejantes nociones no intervienen en la física corriente. La teoría de los sistemas está en plenas condiciones de vérselas con estos asuntos. Es posible definir tales nociones dentro del modelo matemático de un sistema; más aun, en ciertos aspectos pueden deducirse teorías detalladas que derivan los casos especiales a partir de supuestos generales. Un buen ejemplo es la teoría de los equilibrios biológicos, las fluctuaciones cíclicas, etc., iniciada por Lotka, Volterra, Gause y otros. Se da el caso de que la teoría biológica de Volterra y la teoría de la economía cuantitativa son isomorfias en muchos puntos.

Hay, sin embargo, muchos aspectos de organizaciones que no se prestan con facilidad a interpretación cuantitativa. A la ciencia natural no le es ajena esta dificultad. Así, la teoría de los equilibrios biológicos o la de la selección natural son campos muy desarrollados de la biología matemática, y nadie duda de su legitimidad, de que son correctas a rasgos generales y constituyen parte importante de la teoría de la evolución y la ecología. Sin embargo, no es fácil aplicarlas porque los parámetros escogidos, tales como el valor selectivo, el ritmo de destrucción y generación, etc., no son fáciles de medir. Tenemos así que conformarnos con una «explicación en principio», argumentación cualitativa que, con todo, no deja de conducir a consecuencias interesantes.

Como ejemplo de la aplicación de la teoría general de los sistemas a la sociedad humana mencionaremos un libro de Boulding intitulado *The Organizational Revolution*. Boulding parte de un modelo general de la organización y enuncia las que llama leyes férreas, válidas para cualquier organización. Entre ellas están, p. ej., la ley malthusiana de que el incremento de población supera por regla general al de los recursos. Está, asimismo, la ley de las dimensiones óptimas de las organizaciones: mientras más crece una organización, más se alarga el camino para la comunicación, lo cual —y según la naturaleza de la organización— actúa como factor limitante y no permite a la organización crecer más allá de ciertas dimensiones críticas. De acuerdo con la ley de inestabilidad, muchas organizaciones no están en equilibrio estable sino que exhiben fluctuaciones cíclicas resultantes de la interacción entre subsistemas. Dicho sea de paso, esto probablemente podría tratarse en términos de la teoría de Volterra. La llamada primera ley de Volterra revela ciclos periódicos en poblaciones de dos especies, una de las cuales se alimenta de la otra. La importante ley del oligopolio afirma que, si hay organizaciones en competencia, la inestabilidad de sus relaciones, y con ello el peligro de fricción y conflictos, aumenta al disminuir el número de dichas organizaciones. Mientras sean relativamente pequeñas y numerosas, salen adelante en una especie de coexistencia, pero si quedan unas cuantas, o un par, como pasa con los colosales bloques políticos de hoy, los conflictos se hacen devastadores hasta el punto de la mutua destrucción. Es fácil multiplicar el número de tales teoremas generales. Bien pueden desarrollarse matemáticamente, lo cual ya ha sido hecho en algunos aspectos.

*Teoría general de los sistemas y unidad de la ciencia*

Concluiré estas observaciones con unas palabras acerca de las implicaciones generales de la teoría interdisciplinaria.

Quizá pueda resumirse como sigue la función integradora de la teoría general de los sistemas. Hasta aquí se ha visto la unificación de la ciencia en la reducción de todas las ciencias a la física, en la resolución final de todos los fenómenos en acontecimientos físicos. Desde nuestro punto de vista, la unidad de la ciencia adquiere un aspecto más realista. Una concepción unitaria del mundo puede basarse no ya en la esperanza —acaso fútil y de fijo rebuscada— de reducir al fin y al cabo todos los niveles de la realidad al de la física, sino mejor en el isomorfismo de las leyes en diferentes campos. Hablando según lo que se ha llamado el modo «formal» —es decir, contemplando las construcciones conceptuales de la ciencia—, esto significa uniformidades estructurales en los esquemas que estamos aplicando. En lenguaje «material», significa que el mundo, o sea la totalidad de los acontecimientos observables, exhibe uniformidades estructurales que se manifiestan por rastros isomorfos de orden en los diferentes niveles o ámbitos.

Llegamos con ello a una concepción que, en contraste con el reduccionismo, podemos denominar perspectivismo. No podemos reducir los niveles biológico, del comportamiento y social al nivel más bajo, el de las construcciones y leyes de la física. Podemos, en cambio, hallar construcciones y tal vez leyes en los distintos niveles. Como dijo una vez Aldous Huxley, el mundo es un pastel de helado napolitano cuyos niveles —el físico, el biológico, el social y el moral— corresponden a las capas de chocolate, fresa y vainilla. La fresa no es reducible al chocolate —lo más que podemos decir es que quizás en última instancia todo sea vainilla, todo mente o espíritu. El principio unificador es que encontramos organización en todos los niveles. La visión mecanicista del mundo, al tomar como realidad última el juego de las partículas físicas, halló expresión en una civilización que glorifica la tecnología física conducente a fin de cuentas a las catástrofes de nuestro tiempo. Posiblemente el modelo del mundo como una gran organización ayude a reforzar el sentido de reverencia hacia lo viviente que casi hemos perdido en las últimas y sanguinarias décadas de la historia humana.

*La teoría general de los sistemas en la educación:  
la producción de generalistas científicos*

Después de este somero esbozo del significado y las metas de la teoría general de los sistemas, permitaseme hablar de algo que pudiera contribuir a la instrucción integrada. A fin de no parecer parcial, citaré a unos cuantos autores que no se dedicaban a desarrollar la teoría general de los sistemas.

Hace años apareció un artículo, «The Education of Scientific Generalists», escrito por un grupo de científicos, entre ellos el ingeniero Bode, el sociólogo Mosteller, el matemático Tukey y el biólogo Winsor. Los autores hicieron hincapié en «la necesidad de un enfoque más sencillo y unificado de los problemas científicos»:

Oímos con frecuencia que «un hombre no puede ya cubrir un campo suficientemente amplio», y que «hay demasiada especialización limitada»... Es necesario un enfoque más sencillo y unificado de los problemas científicos, necesitamos practicantes de la ciencia, no de una ciencia: en una palabra, necesitamos generalistas científicos. (Bode *et al.*, 1949.)

Los autores ponían entonces en claro el cómo y el porqué de la necesidad de generalistas en campos como la fisicoquímica, la biofísica, la aplicación de la química, la física y las matemáticas a la medicina, y seguían diciendo:

Todo grupo de investigación necesita un generalista, trátase de un grupo institucional en una universidad o fundación, o de un grupo industrial... En un grupo de ingeniería, al generalista le incumbirían naturalmente los problemas de sistemas. Tales problemas surgen cuando se combinan partes en un todo equilibrado. (Bode *et al.*, 1949.)

En un coloquio de la Foundation for Integrated Education, el profesor Mather (1951) discutió los «Integrative Studies for General Education». Afirmó que:

Una de las críticas a la educación general se basa en el hecho de que fácilmente degenera hacia la mera presentación de información tomada de tantos campos de indagación como alcancen a ser repasados en un semestre o un año... Quien oyese a estudiantes adelantados charlando, no dejaría de escuchar a alguno diciendo que «los profesores nos han atiborrado, pero



¿qué quiere decir todo esto?». ... Más importante es la búsqueda de conceptos básicos y principios subyacentes que sean válidos en toda la extensión del conocimiento.

Respondiendo a propósito de la naturaleza de tales conceptos básicos, Mather dice:

Investigadores en campos muy diversos han dado independientemente con conceptos generales muy similares. Semejantes correspondencias son tanto más significativas cuanto que se fundan en hechos totalmente diferentes. Quienes las crearon solían desconocer las labores del prójimo. Partieron de filosofías encontradas, y aun así llegaron a conclusiones notablemente parecidas...

Así concebidos —concluye Mather—, los estudios integrados demostrarían ser parte esencial de la búsqueda de comprensión de la realidad.

No parecen hacer falta comentarios. La instrucción habitual en física, biología, psicología o ciencias sociales las trata como dominios separados, y la tendencia general es hacer ciencias separadas de subdominios cada vez menores, proceso repetido hasta el punto de que cada especialidad se torna un área insignificante, sin nexos con lo demás. En contraste, las exigencias educativas de adiestrar «generalistas científicos» y de exponer «principios básicos» interdisciplinarios son precisamente las que la teoría general de los sistemas aspira a satisfacer. No se trata de un simple programa ni de piadosos deseos, ya que, como tratamos de mostrar, ya está alzándose una estructura teórica así. Vistas las cosas de este modo, la teoría general de los sistemas sería un importante auxilio a la síntesis interdisciplinaria y la educación integrada.

### *Ciencia y sociedad*

Si hablamos de educación, sin embargo, no sólo nos referimos a valores científicos, es decir, a la comunicación e integración de hechos. También aludimos a los valores éticos, que contribuyen al desenvolvimiento de la personalidad. ¿Habrá algo que ganar gracias a los puntos de vista que hemos discutido? Esto conduce al problema fundamental del valor de la ciencia en general, y de las ciencias sociales y de la conducta en particular.

Un argumento muy socorrido acerca del valor de la ciencia y de su repercusión en la sociedad y el bienestar de la humanidad dice más o menos esto: nuestro conocimiento de las leyes de la física es excelente, y en consecuencia nuestro control tecnológico de la naturaleza inanimada es casi ilimitado. El conocimiento de las leyes biológicas no va tan adelantado, pero sí lo bastante para disponer en buena medida de tecnología biológica, en la moderna medicina y biología aplicada. Las esperanzas de vida son superiores a las que disfrutaba el ser humano en los últimos siglos y aun en las últimas décadas. La aplicación de los métodos modernos de agricultura y zootecnia científicas, etc. bastarían para sostener una población humana muy superior a la que hay actualmente en nuestro planeta. Lo que falta, sin embargo, es conocimiento de las leyes de la sociedad humana, y en consecuencia una tecnología sociológica. De ahí que los logros de la física se dediquen a la destrucción cada vez más eficiente; cunde el hambre en vastas partes del mundo mientras que en otras las cosechas se pudren o son destruidas; la guerra y la aniquilación indiferente de la vida humana, la cultura y los medios de subsistencia son el único modo de salir al paso de la fertilidad incontrolada y la consiguiente sobrepoblación. Tal es el resultado de que conozcamos y dominemos demasiado bien las fuerzas físicas, las biológicas medianamente, y las sociales en absoluto. Si dispusiéramos de una ciencia de la sociedad humana bien desarrollada y de la correspondiente tecnología, habría modo de escapar del caos y de la destrucción que amenaza a nuestro mundo actual.

Esto suena plausible, y en realidad no es sino una versión moderna del precepto platónico según el cual si gobernasen los filósofos la humanidad estaría salvada. Hay, no obstante, un defecto en la argumentación. Tenemos bastante idea de cómo sería un mundo científicamente controlado. En el mejor de los casos, sería como el *Mundo feliz* de Huxley; en el peor, como el de 1984 de Orwell. Es un hecho empírico que los logros científicos se dedican tanto o más al uso destructivo que al constructivo. Las ciencias del comportamiento y la sociedad humanas no son excepciones. De hecho, acaso el máximo peligro de los sistemas del totalitarismo moderno resida en que estén tan alarmanamente al corriente no sólo en tecnología física y biológica, sino en la psicológica también. Los métodos de sugestión de masas, de liberación de instintos de la bestia humana, de condicionamiento y control del pensamiento,

están adelantados al máximo; es, ni más ni menos, por ser tan atrozmente científico por lo que el totalitarismo moderno hace que el absolutismo de otros tiempos parezca cosa de aficionados o ficción comparativamente inofensiva. El control científico de la sociedad no lleva a Utopía.

*El precepto último: el hombre como individuo*

Es concebible, sin embargo, la comprensión científica de la sociedad humana y de sus leyes por un camino algo diferente y más modesto. Tal conocimiento no sólo nos enseñará lo que tienen de común en otras organizaciones el comportamiento y la sociedad humanos, sino también cuál es su unicidad. El postulado principal será: el hombre no es sólo un animal político; es, antes y sobre todo, un individuo. Los valores reales de la humanidad no son los que comparte con las entidades biológicas, con el funcionamiento de un organismo o una comunidad de animales, sino los que proceden de la mente individual. La sociedad humana no es una comunidad de hormigas o de termites, regida por instinto heredado y controlada por las leyes de la totalidad superordinada; se funda en los logros del individuo, y está perdida si se hace de éste una rueda de la máquina social. En mi opinión, tal es el precepto último que ofrece una teoría de la organización: no un manual para que dictadores de cualquier denominación sojuzguen con mayor eficiencia a los seres humanos aplicando científicamente las leyes férreas, sino una advertencia de que el Leviatán de la organización no debe engullir al individuo si no quiere firmar su sentencia inapelable.