



**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

*Manibus Nicolai de Cusa Cardinalis, Gottfriedi  
Guglielmi Leibnitii, Joannis Wolfgangi de Goethe  
Aldique Huxleyi, necnon de Bertalanffy Pauli,  
S. J., antecessoris, cosmographi.*



## *Prefacio*

Se diría que el presente volumen requiere algunas notas de introducción, que aclaren su alcance, contenido y método de presentación.

Abundan los textos, monografías, coloquios, etc. dedicados a los «sistemas» y la «teoría de los sistemas». La «ciencia de los sistemas» —o alguno de sus muchos sinónimos— se está volviendo rápidamente parte de los planes de estudio universitarios establecidos. Se trata, más que nada, de una innovación en ingeniería en el sentido amplio del vocablo, requerida por la complejidad de los «sistemas» en la tecnología moderna, por las relaciones entre hombre y máquina, la programación y consideraciones análogas que no se hacían sentir en la tecnología de hace unos años, pero que son ineludibles en las complejas estructuras tecnológicas y sociales del mundo moderno. En este sentido, la teoría de los sistemas es ante todo un campo matemático que ofrece técnicas, en parte novedosas y muy detalladas, estrechamente vinculadas a la ciencia de la computación, y orientado más que nada por el imperativo de vérselas con un nuevo tipo de problema.

Lo que tiende a quedar a oscuras entre estos cambios —por importantes que sean— es el hecho de que la teoría de los sistemas representa un amplio punto de vista que trasciende grandemente los problemas y los requerimientos tecnológicos, una reorientación que se ha vuelto necesaria en la ciencia en general, en toda la gama de disciplinas que va de la física y la biología a las ciencias sociales y del comportamiento y hasta a la filosofía. Con distintos grados de éxito y de exactitud, interviene en varios dominios y

anuncia una nueva visión del mundo que tendrá repercusiones considerables. El que estudia «ciencia de los sistemas» recibe un adiestramiento técnico que convierte la teoría de los sistemas —cuya pretensión inicial era vencer la actual superespecialización— en otra de los cientos de especialidades académicas. Por lo demás, la ciencia de los sistemas, que gira en torno a la tecnología de las computadoras, la cibernética, la automatización y la ingeniería de sistemas, parece hacer de la idea de sistema otra técnica —la última— dedicada a transformar hombre y sociedad, cada vez en mayor medida, en la «megamáquina» cuyo progreso a través de la historia ha descrito Mumford (1967) de modo tan impresionante.

El presente libro aspira a contribuir en los dos aspectos que se acaban de esbozar: ofreciendo al estudioso de la ciencia de los sistemas una visión ampliada, y al lector general un panorama de este adelanto, indudablemente característico del mundo presente e importante para él. Aunque se da clara cuenta de sus limitaciones y peros, el autor se decide a ello por contarse entre los primeros que implantaron la teoría general de los sistemas, hoy campo importante de investigación y aplicación.

Como observó atinadamente Simon (1965), la introducción a un campo en rápido desenvolvimiento consiste en gran medida en su historia conceptual. De ahí que no sea quizá inapropiado el hecho de que esta obra consista en estudios escritos en un periodo de unos treinta años. Así, el libro no expone la teoría de los sistemas como una doctrina rígida (y hasta el presente no lo es), sino en su evolución y el desarrollo de sus ideas; esperamos que esto sirva de base para mayor estudio e investigación.

Con esta intención, los estudios fueron dispuestos en orden lógico antes que cronológico y se revisaron escrupulosamente, sin pasar, con todo, de eliminar repeticiones, mejorar levemente el estilo y hacer trasposiciones oportunas. Intencionalmente no se modificó el contenido a la luz de cosas averiguadas más tarde. Fue imposible evitar del todo las repeticiones, pues a veces se presentaban las mismas ideas en diferentes contextos, pero esperamos no haber salido del nivel tolerable. Acaso esto, a fin de cuentas, no sea tan indeseable para quien busque la idea general o su aplicación a determinado campo.

A continuación de este prefacio se indica la procedencia de los trabajos. Con fines de evaluación del material presentado y por razones de prioridad que no tardarán en verse claras, resumire-

mos así algunos datos principales. El capítulo v (1940) introdujo la «teoría del organismo como sistema abierto». Junto con la labor de Burton (1939), fue el enunciado original de un concepto que ganó creciente importancia y aplicación. Esta publicación casi no la conocieron los científicos británicos y estadounidenses; de ahí que sea reproducida entera, aunque mucho podría añadirse, según se aprecia en parte en los capítulos vii (1964) y vi (1967). Análogamente, en el capítulo iii se reproduce el primer anuncio de la teoría general de los sistemas (1945), abreviado y algo trastrocado, pero fiel en lo demás al original. El Apéndice (reseña de una plática dada en 1947) se reproduce como testimonio temprano, muy anterior al surgimiento académico o tecnológico de la teoría de los sistemas y de términos y temas afines. El capítulo ii es una revisión en lenguaje no técnico (1956); los capítulos i y iv procuran poner la historia al día.

El autor desea extender su agradecimiento a muchas personas e instituciones que facilitaron el trabajo aquí expuesto. Agradece al doctor George Brantl, editor de George Braziller, Inc., haber sugerido la publicación y contribuido valiosamente a ella. Se agradece la autorización de editores que fueron los primeros en publicar los ensayos, y también a instituciones como el National Research Council y el National Cancer Institute of Canada, el Canada Council, el University of Alberta General Research Committee y otros, que patrocinaron parte de la labor aquí descrita. La secretaria del autor, la señora Elizabeth Grundau, se encargó de las distintas fases del manuscrito, ayudó en la bibliografía y en la biblioteca y tradujo los capítulos publicados originalmente en alemán, o sea que hizo mucho más de lo que le incumbía. Por último, debo agradecer a mi esposa, María von Bertalanffy, por su ayuda y crítica infatigables cuando fueron escritos los ensayos. Sin el estímulo de colegas demasiado numerosos, para ser citados, el autor, ante tropiezos y obstáculos, no habría llevado adelante el propósito de implantar y desarrollar la teoría general de los sistemas.

L. v. B.

Universidad de Alberta  
Edmonton (Canadá)  
Marzo de 1968



## *Prefacio a la edición revisada*

En los pocos años transcurridos desde que fue publicado este libro por vez primera, se han dado grandes adelantos en la teoría general de los sistemas. Me es grata, pues, la oportunidad ofrecida por esta edición revisada para presentar algunos comentarios desde el punto que hoy por hoy hemos alcanzado.

Hace unos treinta años que postulé y nombré la teoría general de los sistemas. A partir de entonces, esta teoría —a veces con nombres parecidos— se ha convertido en una disciplina reconocida, objeto de cursos universitarios, textos, compilaciones, revistas, reuniones, grupos de trabajo, centros y demás *accoutrements* de un campo de enseñanza e investigación universitarias. O sea que se ha vuelto realidad mi postulado de una «ciencia nueva».

Todo esto se fundó en desarrollos múltiples, que serán repasados en el presente libro. El punto de vista de los sistemas ha penetrado en muy diversos campos científicos y tecnológicos, en los que incluso se ha tornado indispensable. Este hecho, y el de que represente un nuevo «paradigma» (por usar la expresión de Thomas Kuhn) en el pensamiento científico, tiene por consecuencia que el concepto de sistema pueda ser definido y ahondado de diferentes modos, según lo requieran los objetivos de la investigación, que reflejan distintos aspectos de la noción central.

En tales circunstancias, hay dos maneras de introducirse en este campo. Es posible aceptar uno de los modelos y definiciones disponibles de sistema y derivar rigurosamente la teoría consiguiente. Por fortuna se dispone de presentaciones así, y algunas serán citadas a continuación.

El otro recurso —que será el seguido en este libro— es partir de los problemas, tal como han surgido en las varias ciencias, mostrar la necesidad del punto de vista de los sistemas y desarrollarlo, con mayor o menor detalle, merced a una selección de ejemplos ilustrativos. Semejante procedimiento no presenta una exposición rigurosa de la teoría, y los ejemplos dados serán reemplazables; es decir, a modo de ilustración servirían otros, y acaso mejores. No obstante, de acuerdo con la experiencia del autor —y con la de otros también, a juzgar por la gran aceptación alcanzada por este libro—, tal visión panorámica sirve al que estudia de introducción apropiada a un nuevo modo de pensar, aceptado con interés y hasta entusiasmo, y al ya enterado como punto de partida para mayores trabajos. Testimonio de esto último son las numerosas investigaciones que se inspiraron en la presente obra.

Un crítico competente (Robert Rosen en *Science*, 164, 1969, p. 681) halló «sorprendentemente pocos anacronismos que requirieran corrección» en el presente libro, con todo y que contiene algunos capítulos que se remontan a 30 años atrás. Es éste un gran elogio, si se considera que hoy por hoy las monografías científicas propenden a «requerir corrección» aun en el momento de aparecer. No se debió esto —como insinuaba el mencionado reseñador— a retoques atinados (en realidad el retoque no pasó de un mínimo de mejoramiento estilístico), sino a que, según todas las señales, el autor tenía «razón», en el sentido de haber sentado un cimiento certero y de haber predicho correctamente adelantos venideros. Léanse, por ejemplo, los problemas de sistemas que figuran en el párrafo sobre el isomorfismo en la ciencia del presente libro; hoy en día, estos problemas (y otros) los están resolviendo la teoría dinámica de los sistemas y la teoría del control. El isomorfismo entre leyes es presentado en este libro mediante ejemplos elegidos con ilustraciones intencionalmente sencillas, pero otro tanto es aplicable a casos más enrevesados, que andan lejos de ser matemáticamente triviales. Es, así, un hecho notable que sistemas biológicos tan diversos como el sistema nervioso central y la trama de regulación bioquímica en la célula resulten estrictamente análogos, lo cual se hace aun más significativo cuando se aprecia que esta analogía entre diferentes sistemas en diferentes niveles de organización biológica no es sino un miembro de una vasta clase de analogías. (Rosen, 1967).

En un nivel de mayor generalidad, más de una vez se señaló en

este volumen el «paralelismo entre principios cognoscitivos generales en diferentes campos». No se previó, con todo, que la teoría general de los sistemas habría de desempeñar un importante papel en las orientaciones modernas de la geografía, o de ser paralela al estructuralismo francés (p. ej. Piaget, Lévi-Strauss) y ejercer considerable influencia sobre el funcionalismo sociológico estadounidense.

Con la expansión creciente de la actitud de sistemas y los estudios al respecto, la definición de la teoría general de los sistemas ha sido objeto de renovado escudriñamiento, de modo que quizá no esté de más alguna indicación tocante a su sentido y alcance. La expresión «teoría general de los sistemas» la introdujo el presente autor deliberadamente, en un sentido amplio. Por supuesto, es posible restringirse al sentido «técnico», desde el punto de vista matemático, como tantas veces se hace, pero esto no parece del todo recomendable, en vista de que abundan los problemas de «sistemas» que requieren una teoría no disponible al presente, todavía, en términos matemáticos. De suerte que aquí el nombre de «teoría general de los sistemas» es empleado ampliamente, como se usa la expresión «teoría de la evolución», que viene a significar casi todo lo que cae entre desenterrar fósiles, hacer anatomía o desarrollar la teoría matemática de la selección, o como se habla de «teoría del comportamiento», que va de la observación de pájaros a teorías neurofisiológicas rebuscadas. Lo que cuenta es la llegada de un nuevo paradigma.

A rasgos generales pueden indicarse tres aspectos principales, no separables en cuanto a contenido pero distinguibles en intención. El primero es circunscribible como «ciencia de los sistemas», o sea la exploración y la explicación científicas de los «sistemas» de las varias ciencias (física, biología, psicología, ciencias sociales...), con la teoría general de los sistemas como doctrina de principios aplicables a todos los sistemas (o a subclases definidas de ellos).

Están ingresando en la esfera del pensamiento científico entidades de naturaleza esencialmente nueva. En sus diversas disciplinas —ya fueran la química, la biología, la psicología o las ciencias sociales—, la ciencia clásica procuraba aislar los elementos del universo observado —compuestos químicos, enzimas, células, sensaciones elementales, individuos en libre competencia y tantas cosas más—, con la esperanza de que volviéndolos a juntar, conceptual o experimentalmente, resultaría el sistema o totalidad —célula, mente, sociedad—, y sería inteligible. Ahora hemos aprendido que para comprender no se requieren sólo los elementos sino las relaciones entre ellos

—digamos, la interacción enzimática en una célula, el juego de muchos procesos mentales conscientes e inconscientes, la estructura y dinámica de los sistemas sociales, etc. Esto requiere la exploración de los numerosos sistemas de nuestro universo observado, por derecho propio y con sus especificidades. Por añadidura, aparecen aspectos, correspondencias e isomorfismos generales comunes a los «sistemas». Tal es el dominio de la *teoría general de los sistemas*; de hecho, tales paralelismos o isomorfismos aparecen —a veces inesperadamente— en «sistemas» del todo distintos por lo demás. De modo que la teoría general de los sistemas es la exploración científica de «todos» y «totalidades» que no hace tanto se consideraban nociones metafísicas que salían de las lindes de la ciencia. Para vérselas con ello han surgido novedosas concepciones, modelos y campos matemáticos, como la teoría dinámica de los sistemas, la cibernética, la teoría de los autómatas, el análisis de sistemas merced a las teorías de los conjuntos, las redes y las gráficas, y así sucesivamente.

El segundo territorio es el de la «tecnología de los sistemas», o sea el de los problemas que surgen en la tecnología y la sociedad modernas y que comprenden tanto el *hardware* de computadoras, automatización, maquinaria autorregulada, etc., como el *software* de los nuevos adelantos y disciplinas teóricas.

La tecnología y la sociedad modernas se han vuelto tan complejas que los caminos y medios tradicionales no son ya suficientes, y se imponen actitudes de naturaleza holista, o de sistemas, y generalista, o interdisciplinaria. Esto es cierto en muchos sentidos. Sistemas en múltiples niveles piden control científico: ecosistemas, cuya perturbación lleva a problemas apremiantes como el de la contaminación; organizaciones formales, como la burocracia, las instituciones educativas o el ejército; los graves problemas que se presentan en sistemas socioeconómicos, en relaciones internacionales, política y represalias. Sin importar hasta dónde sea posible la comprensión científica (en contraste con la admisión de la irracionalidad de los acontecimientos culturales e históricos), y en qué grado sea factible, o aun deseable, el control científico; es indiscutible que son en verdad problemas «de sistemas», o sea problemas de interrelaciones entre gran número de «variables». Lo mismo se aplica a objetivos más limitados en la industria, el comercio y el armamento. Los requerimientos tecnológicos han conducido a nuevos conceptos y disciplinas, en parte muy originales y que implantan nuevas nocio-

nes básicas, como las de las teorías del control y la información, de los juegos y de la decisión, de los circuitos y de las colas, etc. La característica general, una vez más, es que éstas descienden de problemas específicos y concretos en tecnología, pero los modelos, conceptualizaciones y principios —así los de información, retroalimentación, control, estabilidad, circuito, etc.— han ido mucho más allá de las fronteras de las especialidades, tienen naturaleza interdisciplinaria y resultaron independientes de sus concreciones especiales, según lo ilustran modelos isomorfos de retroalimentación en sistemas mecánicos, hidrodinámicos, eléctricos, biológicos, etc. Análogamente, convergen adelantos originados en ciencia pura y aplicada, como en la teoría dinámica de los sistemas y la teoría del control. Una vez más se extiende todo un espectro desde la teoría matemática muy afinada, pasando por la simulación con computadora, en la cual pueden tratarse variables cuantitativamente, en ausencia de soluciones analíticas, hasta la discusión más o menos informal de problemas que tienen que ver con sistemas.

En tercer lugar está la «filosofía de los sistemas», a saber, la reorientación del pensamiento y la visión del mundo resultante de la introducción del «sistema» como nuevo paradigma científico (en contraste con el paradigma analítico, mecanicista, unidireccionalmente causal, de la ciencia clásica). Al igual que toda teoría científica de gran alcance, la teoría general de los sistemas tiene sus aspectos «metacientíficos» o filosóficos. El concepto de «sistema» constituye un nuevo «paradigma», por hablar como Thomas Kuhn, o una «nueva filosofía de la naturaleza», según dijo quien esto escribe (1967), contrastando las «leyes ciegas de la naturaleza» de la visión mecanicista del mundo y el devenir del mundo como argumento shakespeariano contado por un idiota, con una visión orgánica de «el mundo como una gran organización».

Esto bien puede dividirse en tres partes. Tenemos, primero, que dar con la «naturaleza del animal». Se trata de la *ontología de sistemas* —qué se entiende por «sistema» y cómo están plasmados los sistemas en los distintos niveles del mundo de la observación.

Qué haya de definirse y de describirse como sistema no es cosa que tenga respuesta evidente o trivial. Se convendrá en que una galaxia, un perro, una célula y un átomo son *sistemas reales*, esto es, entidades percibidas en la observación o inferidas de ésta, y que existen independientemente del observador. Por otro lado están los *sistemas conceptuales*, como la lógica, las matemáticas

(pero incluyendo, p. ej., también la música), que son ante todo construcciones simbólicas, con *sistemas abstraídos* (ciencia) como subclase de las últimas, es decir, sistemas conceptuales correspondientes a la realidad.

Con todo, la distinción no es, ni mucho menos, tan nitida y clara como pudiera creerse. Un ecosistema o un sistema social es bien «real», según apreciamos en carne propia cuando, digamos, el ecosistema es perturbado por la contaminación, o la sociedad nos pone enfrente tantos problemas insolutos. Mas no se trata de objetos de percepción u observación directa; son construcciones conceptuales. Lo mismo pasa hasta con los objetos de nuestro mundo cotidiano, que en modo alguno son sencillamente «datos» como datos sensoriales o simples percepciones, sino que en realidad están contruidos con innumerables factores «mentales» que van de la dinámica gestaltista y los procesos de aprendizaje a los factores culturales y lingüísticos que determinan en gran medida lo que de hecho «vemos» o percibimos. Así, la distinción entre objetos y sistemas «reales» dados en la observación, y construcciones y sistemas «conceptuales», es imposible de establecer sin más que sentido común. Se trata de hondos problemas que aquí apenas podemos señalar.

Esto nos lleva a la *epistemología de sistemas*. De lo anterior se desprende cuánto difiere de la epistemología del positivismo o empirismo lógico, con todo y que comparta su actitud científica. La epistemología (y metafísica) del positivismo lógico está determinada por las ideas de fisicalismo, atomismo y la «teoría de la cámara» para el conocimiento. Todo esto está anticuado a la luz de los conocimientos de hoy. Frente al fisicalismo y el reduccionismo, los problemas y modos de pensamiento de las ciencias biológicas, sociales y del comportamiento requieren igual consideración, y la simple «reducción» a las partículas elementales y las leyes ordinarias de la física no parece ser factible. En comparación con el proceder analítico de la ciencia clásica, con resolución en elementos componentes y causalidad lineal o unidireccional como categoría básica, la investigación de totalidades organizadas de muchas variables requiere nuevas categorías de interacción, transacción, organización, teleología, etc., con lo cual surgen muchos problemas para la epistemología y los modelos y técnicas matemáticos. Además la percepción no es una reflexión de «cosas reales» (cualquiera que sea su condición metafísica), ni el conocimiento una mera aproximación a la «verdad»

o la «realidad». Es una interacción entre conocedor y conocido, dependiente de múltiples factores de naturaleza biológica, psicológica, cultural, lingüística, etc. La propia física nos enseña que no hay entidades últimas tales como corpúsculos u ondas, que existan independientemente del observador. Esto conduce a una filosofía «perspectivista» para la cual la física, sin dejar de reconocerle logros en su campo y en otros, no representa el monopolio del conocimiento. Frente al reduccionismo y las teorías que declaran que la realidad no es «nada sino» (un montón de partículas físicas, genes, reflejos, pulsiones o lo que sea), vemos la ciencia como una de las «perspectivas» que el hombre, con su dotación y servidumbre biológica, cultural y lingüística, ha creado para vérselas con el universo al cual está «arrojado» o, más bien, al que está adaptado merced a la evolución y la historia.

La tercera parte de la filosofía de los sistemas se ocupará de las relaciones entre hombre y mundo o de lo que se llaman «valores» en el habla filosófica. Si la realidad es una jerarquía de totalidades organizadas, la imagen del hombre diferirá de la que le otorgue un mundo de partículas físicas gobernadas por el azar, como realidad última y sola «verdadera». Antes bien, el mundo de los símbolos, valores, entidades sociales y culturas es algo muy «real», y su inclusión en un orden cósmico de jerarquías pudiera salvar la oposición entre las «dos culturas» de C. P. Snow, la ciencia y las humanidades, la tecnología y la historia, las ciencias naturales y sociales, o como se quiera formular la antítesis.

Este cuidado humanístico de la teoría general de los sistemas, tal como la entiendo, la distingue de los teóricos de los sistemas, orientados de modo mecanicista, que sólo hablan en términos de matemáticas, retroalimentación y tecnología, despertando el temor de que la teoría de los sistemas sea en realidad el paso final hacia la mecanización y la devaluación del hombre y hacia la sociedad tecnocrática. Aunque comprendo y subrayo el aspecto matemático, científico puro y aplicado, no me parece que sea posible evadir estos aspectos humanísticos, si es que la teoría general de los sistemas no ha de limitarse a una visión restringida y fraccionaria.

He aquí acaso otra razón para usar este libro como introducción al campo. Una exposición como de libro de texto debe seguir el camino derecho y estrecho de la rectitud matemática y científica. No hay que insistir en la necesidad de semejante exposición «técni-

ca». Pero hay otros muchos problemas que abarca la teoría general de los sistemas y a los que este libro servirá de guía.

Aparte de una bibliografía muy amplia, que indica las fuentes citadas en el texto, se da una lista de lecturas recomendadas que sin duda serán de provecho para el estudiante. Más específicamente, las siguientes publicaciones recientes servirán de valiosa ampliación en torno a temas expuestos en este libro. Se discuten los distintos enfoques de la teoría general de los sistemas en *Trends in General Systems Theory* (G. Klir, ed.) y en *Unity through Diversity (Festschrift in Honor of L. von Bertalanffy, W. Gray y N. Rizzo, eds.)*, en especial los libros II y IV. La teoría dinámica de los sistemas es expuesta en *Dynamical System Theory* por Robert Rosen. La *Biophysik* de W. Beier (de la que seguramente habrá pronto traducción inglesa) contiene una excelente presentación de la teoría dinámica de los sistemas y de la teoría de los sistemas abiertos, siguiendo los lineamientos del presente autor. Una elaboración axiomática es *An Approach to General Systems Theory*, de G. J. Klir. Por lo que respecta a la teoría de los sistemas desarrollada desde el punto de vista de la tecnología del control, sugerimos *Einführung in die moderne Systemtheorie*, de H. Schwarz. Acerca de la teoría de los sistemas en las ciencias del hombre son importantes los siguientes libros: *General Systems Theory and Psychiatry* (W. Gray, F. D. Duhl y N. D. Rizzo, eds.); *Modern Systems Research for the Behavioral Scientist* (W. Buckley, ed.); *System, Change and Conflict* (N. J. Demerath y R. A. Peterson, eds.). La filosofía de los sistemas es desarrollada en *Introduction to Systems Philosophy*, de Laszlo.

Salvo por la corrección de alguna errata, conservamos el texto de la edición original, añadiéndole este prefacio, el apéndice «Notas sobre adelantos en la teoría matemática de los sistemas» y un suplemento bibliográfico al final. Esperamos que este libro siga sirviendo como introducción para los estudiantes y de estímulo a quienes se ocupan de la teoría general de los sistemas.

## *Procedencia de los capítulos*

La mayoría de los capítulos de este volumen han aparecido anteriormente, a veces en forma modificada. A continuación se da la historia de cada uno.

Capítulo I: Escrito para este volumen (1967).

Capítulo II: «General System Theory», en *Main Currents in Modern Thought*, vol. 11, # 4, marzo de 1955, pp. 75-83. Reproducido en *General Systems*, 1 (1956), 1-10; R. W. Taylor, ed., *Life, Language, Law, Essays in Honor of A. F. Bentley*, Yellow Springs (Ohio), Antioch Press, 1957, pp. 58-78; J. D. Singer, ed., *Human Behavior and International Politics*, Chicago, Rand McNally & Co., 1965, pp. 20-31; N. J. Demerath III y R. A. Peterson, eds., *System, Change, and Conflict*, Glencoe (Ill.), Free Press, 1967. Fueron tomadas ampliaciones de «Allgemeine Systemtheorie. Wege zu einer neuen mathesis universalis», *Deutsche Universitätszeitung*, 5/6 (1957), 8-12. También en italiano, «La teoría generale dei sistemi», *La Voce dell'America*, 18-G y 2-H (1956-57), y en francés, «Histoire et méthodes de la théorie générale des systèmes», *Atomes*, 21 (1956) 100-104.

Capítulo III: Condensado de «Zu einer allgemeinen Systemlehre», *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, 18, núm. 3/4 (1945); «An Outline of General System Theory», *British Journal of the Philosophy of Science*, 1 (1950), 139-164; «Zu einer allgemeinen Systemlehre», *Biologia Generalis*, 19 (1949), 114-129.

Capítulo IV: «General System Theory. A Critical Review», *General Systems*, 7 (1962), 1-20; reimpresso en W. Buckley, ed., *Modern*

*Systems Research for the Behavioral Scientist*, Chicago, Aldine Publishing Co., 1968, pp. 11-30.

Capítulo v: «Der Organismus als physikalisches System betrachtet» *Die Naturwissenschaften*, 28 (1940), 521-531.

Capítulo vi: «Das Modell des offenen Systems», *Nova Acta Leopoldina* (1969).

Capítulo vii: «Basic Concepts in Quantitative Biology of Metabolism», *Helgoländer Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen*, 9 (First International Symposium on Quantitative Biology of Metabolism) (1964), 5-37.

Capítulo viii: Extracto de conferencias pronunciadas de la University of Western Ontario (London), la University of California Medical School (San Francisco), la University of Alberta (Edmonton, Calgary), etc., 1961-64.

Capítulo ix: «General System Theory and Psychiatry»; del capítulo 43 de *The American Handbook of Psychiatry*, vol. 3, Silvano Arieti, red., Basic Books, Inc., Nueva York, 1966.

Capítulo x: «An Essay on the Relativity of Categories», *Philosophy of Science*, 22 (1955), 243-263; reimpresso en *General Systems*, 7 (1962), 71-83.

Apéndice: «Vom Sinn und der Einheit der Naturwissenschaften. Aus einem Vortrag von Prof. Dr. Ludwig von Bertalanffy», *Der Student*, Wien, 2, núm. 7/8 (1947), 10-11.

# *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 contemplamos 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 viése 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, requerirla 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 parangón 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 Pözl, 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 biotemático 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 *Raffferenzprinzip* 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 acontecimientos, 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 autorregulación, 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 dilucidar 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

\* Cortada 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 « $\Phi$ » y «O» 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» antagónicas con especificaciones.

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

La *teoría de las colas* se ocupa de la optimización de disposiciones en condiciones de apilamiento.

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 su 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 basto) 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 monóticamente 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 autómeta 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 autómeta (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 autómeta 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 físico-químico, 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.