

**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 nítida 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 teoria 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 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 éste «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 «organismica», 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 teísta —*quem Deus perdere vult dementat*—, parecemos seguir alguna trágica necesidad histórica.

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

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

En las últimas décadas hemos asistido al surgimiento

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

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

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

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

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

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

En torno a la historia de la teoría de los sistemas

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Quedó de manifiesto entonces otra generalización. En muchos fenómenos biológicos, pero también de las ciencias sociales y del comportamiento, resultan aplicables expresiones y modelos matemáticos. Evidentemente, no es cosa de las entidades de la física y la química, y en este sentido trascienden la física como paradigma 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 equívoca*, en vista de que analogías superficiales —como en la famosa comparación de la sociedad con un «organismo»— disimulan diferencias genuinas y conducen así a conclusiones erradas y hasta moralmente objetables. Para otros, en fin, era filosófica y metodológicamente *inválida* porque la pretendida «irreductibilidad» de niveles superiores a inferiores tendía a impedir una indagación analítica cuyo éxito era evidente en varios campos, como la reducción de la química a principios físicos, o de los fenómenos de la vida a la biología molecular.

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

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

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

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

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

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

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

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

Los conceptos de conducta intencional y de teleología se han asociado por largo tiempo a una misteriosa capacidad auto-perfectiva o buscadora de metas, o causa final, ordinariamente de origen sobrehumano o sobrenatural. Para adelantar en el estudio de los 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

* Cortesía de Electronic Associates, Inc.

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

Teoría de los compartimientos. Un aspecto de los sistemas que

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

No hay ni que decir que a menudo existe incongruencia entre modelo y realidad. Hay modelos matemáticos muy complicados y rebuscados, pero no deja de ser dudoso cómo podrán aplicarse al caso concreto; existen problemas fundamentales para los cuales no disponemos de técnicas matemáticas. Ha habido desencanto de esperanzas excesivas. La cibernética, pongamos por caso, demostró su repercusión no sólo en la tecnología sino en ciencias básicas, al proporcionar modelos para fenómenos concretos y traer fenómenos teleológicos —antes tabú— al ámbito de los problemas científicamente legítimos; mas no ofreció una explicación totalizante o gran «visión del mundo», por 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 *hasto*) y a la notación arábiga con valor posicional; ecuaciones, desde la formulación verbal hasta el rudimentario simbolismo manejado con virtuosismo (aunque para nosotros difícil de seguir) por Diofanto y otros fundadores del álgebra, y de ahí a la notación moderna; teorías como las de Darwin o de la economía, que no hallaron hasta más tarde formulación matemática (parcial). Quizá valga más tener primero algún modelo no matemático, con sus limitaciones, pero que exprese algún aspecto previamente inadvertido, en espera del surgimiento venidero de algún algoritmo apropiado, que partir de modelos matemáticos prematuros que calquen algoritmos conocidos y con ello acaso restrinjan el campo visual. Muchos adelantos en biología molecular, teoría de la selección, cibernética y otros campos exhibieron los efectos cegadores de lo que Kuhn llama ciencia «normal» —esquemas conceptuales monolíticamente aceptados.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Cuadro 1.2

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

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

Cuadro 1-2 (continuación)

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

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

II. El significado de la teoría general de los sistemas

En pos de una teoría general de los sistemas

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Metas de la teoría general de los sistemas

Tales consideraciones se resumen así.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sistemas cerrados y abiertos: limitaciones de la física ordinaria

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

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

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

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

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

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

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

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

Información y entropía

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

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

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

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

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

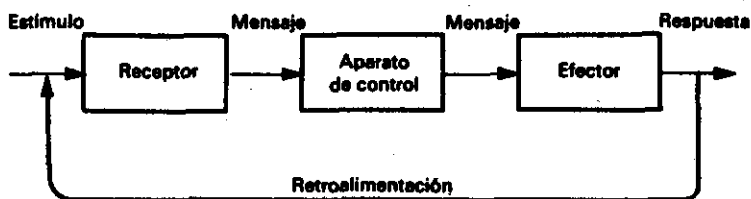


Fig. 2.1. Esquema sencillo de retroalimentación.

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

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

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

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

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

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

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

Causalidad y teleología

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

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

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

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

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

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

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

¿Qué es organización?

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

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

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

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

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

Teoría general de los sistemas y unidad de la ciencia

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ciencia y sociedad

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

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

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

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

El precepto último: el hombre como individuo

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

III. Consideración matemática elemental de algunos conceptos de sistema

El concepto de sistema

Al manejar complejos de «elementos» pueden establecerse tres tipos de distinción, a saber: (1) de acuerdo con su *número*; (2) de acuerdo con sus *especies*; (3) de acuerdo con las *relaciones* entre elementos. La siguiente ilustración sencilla aclarará esto (Fig. 3.1); aquí *a* y *b* simbolizan varios complejos.

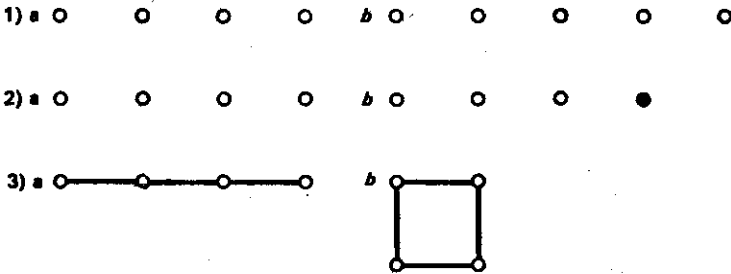


Fig. 3.1.

En los casos (1) y (2), el complejo puede ser comprendido (cf. pp. 68 *ss*) como suma de elementos considerados aisladamente. En el caso (3), no sólo hay que conocer los elementos, sino también las relaciones entre ellos. Características del primer tipo pueden llamarse *sumativas*, y *constitutivas* las del segundo. También podemos

decir que las características sumativas de un elemento son aquellas que son las mismas dentro y fuera del complejo; se obtienen, pues, por suma de características y comportamiento de elementos tal como son conocidos aislados. Las características constitutivas son las que dependen de las relaciones específicas que se dan dentro del complejo; para entender tales características tenemos, por tanto, que conocer no sólo las partes sino también las relaciones.

Características físicas del primer tipo son, p. ej., el peso o el peso molecular (sumas de pesos o de pesos atómicos, respectivamente), el calor (considerado como suma de movimientos de las moléculas), etc. Un ejemplo de la segunda clase son las características químicas (p. ej. la isomería, las diferentes características de compuestos de igual composición total pero con diferentes disposiciones de los átomos en la molécula).

El sentido de la expresión algo mística «el todo es más que la suma de sus partes» reside sencillamente en que las características constitutivas no son explicables a partir de las características de partes aisladas. Así, las características del complejo, comparadas con las de los elementos, aparecen como «nuevas» o «emergentes». Sin embargo, si conocemos el total de partes contenidas en un sistema y la relación que hay entre ellas, el comportamiento del sistema es derivable a partir del comportamiento de las partes. También puede decirse: si bien es concebible la composición gradual de una suma, un sistema, como total de partes interrelacionadas, tiene que ser concebido como compuesto instantáneamente.

Desde el punto de vista físico, estos enunciados son triviales; sólo podrían hacerse problemáticos y llevar a concepciones confusas en biología, psicología y sociología a causa de mala interpretación de la concepción mecanicista, con la tendencia a la división de los fenómenos en elementos y cadenas causales independientes, descurriendo las interrelaciones gracias a un rodeo.

Rigurosamente desarrollada, la teoría general de los sistemas habría de tener naturaleza axiomática; esto es, a partir de la noción de «sistema» y un conjunto adecuado de axiomas se deducirían proposiciones que expresasen propiedades y principios de sistemas. Las consideraciones que siguen son mucho más modestas. Sólo ilustran algunos principios de sistemas merced a formulaciones que son sencillas e intuitivamente accesibles, sin aspirar a rigor y generalidad matemáticos.

Un sistema puede ser definido como un complejo de elementos interactuantes. Interacción significa que elementos, p , están en relaciones, R , de suerte que el comportamiento de un elemento p en R es diferente de su comportamiento en otra relación R' . Si los comportamientos en R y R' no difieren, no hay interacción, y los elementos se comportan independientemente con respecto a las relaciones R y R' .

Es posible definir matemáticamente un sistema de varias maneras. Tomemos como ilustración un sistema de ecuaciones diferenciales simultáneas. Denotando por Q_i alguna magnitud de elementos p_i ($i = 1, 2, \dots, n$), para un número finito de elementos y en el caso más sencillo, las ecuaciones tendrán la forma

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ_1}{dt} &= f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ \frac{dQ_2}{dt} &= f_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dQ_n}{dt} &= f_n(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

De esta suerte, el cambio de cualquier magnitud Q_i es función de todas las Q , de Q_1 a Q_n ; a la inversa, el cambio de cualquier Q_i acarrea cambio en todas las demás magnitudes y en el sistema en conjunto.

Sistemas de ecuaciones de este género se encuentran en muchos campos y representan un principio general de cinética. P. ej., en la *Simultankinetik* tal como la desarrolló Skrabal (1944, 1949), ésta es la expresión general de la ley de acción de masas. El mismo sistema fue empleado por Lotka (1925) en sentido amplio, especialmente con respecto a problemas demográficos. Las ecuaciones para sistemas biocenóticos deducidas por Volterra, Lotka, D'Ancona, Gause y otros, son casos especiales de las expresiones (3.1). Otro tanto ocurre con las ecuaciones usadas por Spiegelman (1945) para la cinética de los procesos celulares y la teoría de la competencia dentro de un organismo. G. Werner (1947) presentó un sistema parecido, aunque algo más general (considerándolo continuo y, por tanto, recurriendo a ecuaciones diferenciales parciales con res-

pecto a x , y , z y t), como ley básica de la farmacodinamia, a partir de la cual son derivables las varias leyes de la acción de medicamentos, insertando las condiciones especiales pertinentes.

Semejante definición de «sistema», claro está, no es general en modo alguno. Prescinde de condiciones espaciales y temporales, que podrían expresarse mediante ecuaciones diferenciales parciales. Tampoco toma en cuenta una posible dependencia de aconteceres con respecto a la historia previa del sistema («histéresis» en sentido amplio); la consideración de esto transformaría el sistema en ecuaciones integrodiferenciales según las discutió Volterra (1931; cf. también D'Ancona, 1939, y Donnan 1937). La introducción de tales ecuaciones tendría un significado definido: el sistema considerado no sólo constituiría un todo espacial, sino también temporal.

Pese a estas restricciones, el sistema (3.1) sirve para discutir varias propiedades generales de sistemas. Aunque nada se afirme acerca de la naturaleza de las magnitudes Q_i o de las funciones f_i —o sea acerca de las relaciones e interacciones dentro del sistema—, pueden deducirse algunos principios generales.

Hay una condición de estado estacionario, caracterizada por la desaparición de los cambios dQ_i/dt :

$$f_1 = f_2 = \dots f_n = 0 \quad (3.2)$$

Igualando a cero obtenemos n ecuaciones para n variables, y resolviéndolas obtenemos los valores:

$$\left. \begin{array}{l} Q_1 = Q_1^* \\ Q_2 = Q_2^* \\ \dots\dots\dots \\ Q_n = Q_n^* \end{array} \right\} \quad (3.3)$$

Estos valores son constantes, ya que, tal como se presupuso, en el sistema desaparecen los cambios. En general, habrá múltiples estados estacionarios, algunos estables, algunos inestables.

Pueden introducirse nuevas variables:

$$Q_i = Q_i^* - Q_i' \quad (3.4)$$

y ser reformulado el sistema (3.1):

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ_1'}{dt} &= f_1' (Q_1', Q_2', \dots, Q_n') \\ \frac{dQ_2'}{dt} &= f_2' (Q_1', Q_2', \dots, Q_n') \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dQ_n'}{dt} &= f_n' (Q_1', Q_2', \dots, Q_n') \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Supongamos que el sistema puede ser desarrollado en serie de Taylor:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ_1'}{dt} &= a_{11} Q_1' + a_{12} Q_2' + \dots \\ &\quad a_{1n} Q_n' + a_{111} Q_1'^2 + a_{112} Q_1' Q_2' + a_{122} Q_2'^2 + \dots \\ \frac{dQ_2'}{dt} &= a_{21} Q_1' + a_{22} Q_2' + \dots \\ &\quad a_{2n} Q_n' + a_{211} Q_1'^2 + a_{212} Q_1' Q_2' + a_{222} Q_2'^2 + \dots \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dQ_n'}{dt} &= a_{n1} Q_1' + a_{n2} Q_2' + \dots \\ &\quad a_{nn} Q_n' + a_{n11} Q_1'^2 + a_{n12} Q_1' Q_2' + a_{n22} Q_2'^2 + \dots \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

Una solución general de este sistema de ecuaciones es:

$$\left. \begin{aligned} Q_1' &= G_{11}e^{\lambda_1 t} + G_{12}e^{\lambda_2 t} + \dots G_{1n}e^{\lambda_n t} + G_{111}e^{2\lambda_1 t} + \dots \\ Q_2' &= G_{21}e^{\lambda_1 t} + G_{22}e^{\lambda_2 t} + \dots G_{2n}e^{\lambda_n t} + G_{211}e^{2\lambda_1 t} + \dots \\ &\dots\dots\dots \\ Q_n' &= G_{n1}e^{\lambda_1 t} + G_{n2}e^{\lambda_2 t} + \dots G_{nn}e^{\lambda_n t} + G_{n11}e^{2\lambda_1 t} + \dots \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

donde las G son constantes y λ las raíces de la ecuación característica :

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & a_{1n} \\ a_{12} & a_{22} - \lambda & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (3.8)$$

Las raíces λ pueden ser reales o imaginarias. Examinando las ecuaciones (3.7) encontramos que si todas las λ son reales y negativas (o, de ser complejas, negativas en sus partes reales), Q_i' , al crecer el tiempo, tiende a 0, ya que $e^{-\infty} = 0$; pero, sin embargo, como según (3.5) $Q_i = Q_i^* - Q_i'$, con ello las Q_i obtienen los valores estacionarios Q_i^* . En este caso el equilibrio es *estable*, ya que, dado un tiempo suficiente, el sistema se acerca todo lo posible al estado estacionario.

Sin embargo, si una de las λ es positiva o nula, el equilibrio es *inestable*.

Por último, si algunas λ son positivas y complejas, el sistema contiene términos periódicos, ya que la función exponencial para exponentes complejos tiene la forma:

$$e^{(a - ib)t} = e^{at} (\cos bt - i \operatorname{sen} bt).$$

En este caso habrá *fluctuaciones periódicas*, que, generalmente están amortiguadas.

Como ilustración considérese el caso más sencillo, con $n = 2$; un sistema consistente en dos clases de elementos:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ_1}{dt} &= f_1(Q_1, Q_2) \\ \frac{dQ_2}{dt} &= f_2(Q_1, Q_2) \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Con tal que las funciones, una vez más, puedan desarrollarse en serie de Taylor, la solución es:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= Q_1^* - G_{11}e^{\lambda_1 t} - G_{12}e^{\lambda_2 t} - G_{111}e^{2\lambda_1 t} - \dots \\ Q_2 &= Q_2^* - G_{21}e^{\lambda_1 t} - G_{22}e^{\lambda_2 t} - G_{211}e^{2\lambda_1 t} - \dots \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

con Q_1^* , Q_2^* como valores estacionarios de Q_1 , Q_2 , obtenidos haciendo $f_1 = f_2 = 0$; las G son constantes de integración y λ raíces de la ecuación característica:

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda \end{vmatrix} = 0,$$

o, desarrollando:

$$\begin{aligned} (a_{11} - \lambda)(a_{22} - \lambda) - a_{12}a_{21} &= 0, \\ \lambda^2 - \lambda C + D &= 0, \end{aligned}$$

$$\lambda = \frac{C}{2} \pm \sqrt{-D + \left(\frac{C}{2}\right)^2}$$

con:

$$C = a_{11} + a_{22}; \quad D = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}.$$

En el caso:

$$C < 0, D > 0, E = C^2 - 4D > 0,$$

ambas soluciones de la ecuación característica son negativas. Así se da un *nodo*; el sistema se acercará a un estado estacionario estable (Q_1^* , Q_2^*) a medida que $e^{-\infty}$ tiende a 0, y con ello los términos segundo y siguientes disminuyen continuamente (Fig. 3.2).

En el caso:

$$C < 0, D > 0, E = C^2 - 4D < 0.$$

ambas soluciones de la ecuación característica son complejas, con parte real negativa. En este caso tenemos un *bucle* y los puntos (Q_1 , Q_2) tienden hacia (Q_1^* , Q_2^*) describiendo una curva espiral.

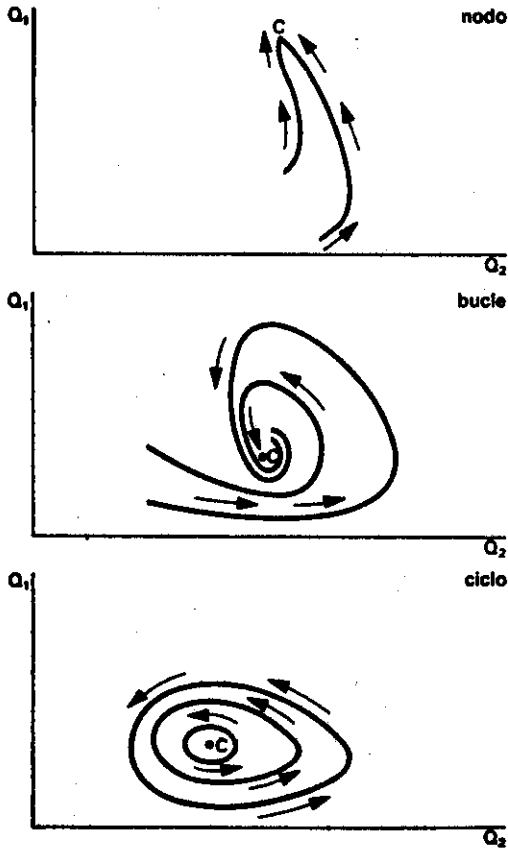


Fig. 3.2.

En el caso:

$$C = 0, D > 0, E < 0,$$

ambas soluciones son imaginarias, de suerte que la solución contiene términos periódicos; habrá oscilaciones o ciclos en torno a los valores estacionarios. El punto (Q_1, Q_2) describe una *curva cerrada* alrededor de (Q_1^*, Q_2^*) .

En el caso:

$$C > 0, D < 0, E > 0,$$

ambas soluciones son positivas y no hay estado estacionario.

Crecimiento

Ecuaciones de este tipo se presentan en diversos campos, y puede usarse el sistema (3.1) para ilustrar la identidad formal de las leyes de sistemas en varios territorios o, en otras palabras, para demostrar la existencia de una teoría general de los sistemas.

Esto puede ser mostrado en el caso más sencillo, el del sistema consistente en elementos de sólo una clase. En tal caso el sistema de ecuaciones se reduce a la única ecuación:

$$\frac{dQ}{dt} = f(Q), \quad (3.11)$$

que puede desarrollarse en serie de Taylor:

$$\frac{dQ}{dt} = a_1 Q + a_{11} Q^2 + \dots \quad (3.12)$$

Esta serie no contiene un término absoluto para el caso de no haber «generación espontánea» de elementos. De suerte que dQ/dt desaparecerá para $Q = 0$, la cual sólo es posible si el término absoluto es igual a 0.

La posibilidad más sencilla se realiza cuando nos quedamos sólo con el primer término de la serie:

$$\frac{dQ}{dt} = a_1 Q. \quad (3.13)$$

Esto significa que el crecimiento del sistema es directamente proporcional al número de elementos presentes. Según la constante a_1 sea positiva o negativa, el crecimiento del sistema será positivo o negativo y el sistema aumentará o disminuirá. La solución es:

$$Q = Q_0 e^{a_1 t} \quad (3.14)$$

donde Q_0 significa el número de elementos cuando $t = 0$. Es la ley exponencial (Fig. 3.3), que se halla en tantos campos.

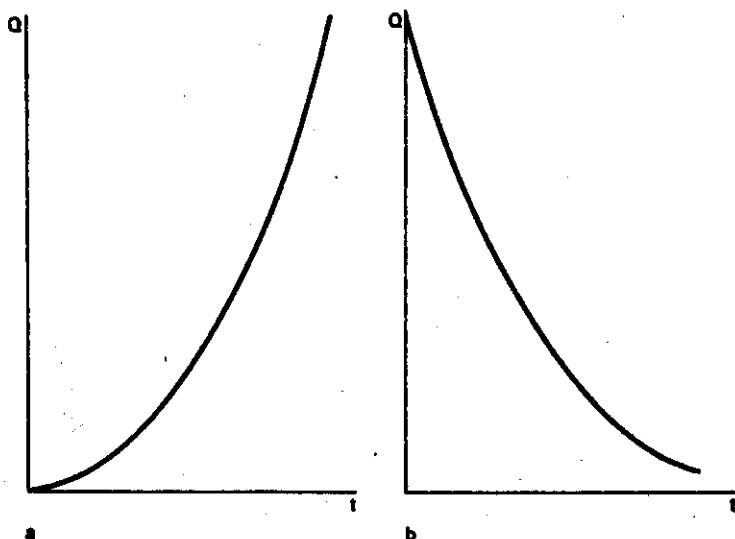


Fig. 3.3. Curvas exponenciales.

En matemáticas, la ley exponencial se denomina «ley de crecimiento natural», y con $a_1 > 0$ es válida para el aumento del capital por interés compuesto. Biológicamente se aplica al crecimiento individual de ciertas bacterias y animales. Sociológicamente, es válida para la multiplicación sin restricciones de poblaciones vegetales o animales, en el caso más sencillo la multiplicación de bacterias al dividirse cada individuo en dos, que dan cuatro, etc. En la ciencia social se llama ley de Malthus y representa el crecimiento ilimitado de una población cuya tasa de natalidad es superior a la de mortalidad. Describe también el aumento del conocimiento humano, medido en páginas de texto dedicadas a descubrimientos científicos, o el número de publicaciones acerca de la drosófila (Hersh, 1942). Con constante negativa ($a_1 < 0$), la ley exponencial se aplica a la desintegración radiactiva, a la descomposición de un compuesto químico por reacción monomolecular, al exterminio de bacterias por radiación o veneno, a la pérdida de sustancia corporal por hambre en un organismo multicelular, al ritmo de extinción de una población en la cual la tasa de mortalidad es superior a la de natalidad, etc.

Volviendo a la ecuación (3.12) y conservando dos términos se tiene:

$$\frac{dQ}{dt} = a_1 Q + a_{11} Q^2 \quad (3.15)$$

Una solución de esta ecuación es:

$$Q = \frac{a_1 C e^{a_1 t}}{1 - a_{11} C e^{a_1 t}} \quad (3.16)$$

La retención del segundo término acarrea una importante consecuencia. La expresión exponencial simple (3.14) exhibe un incremento infinito; tomando en cuenta el segundo término se obtiene una curva que es sigmoide y alcanza un valor límite. Se trata de la llamada *curva logística* (Fig. 3.4), también de muy diversa aplicación.

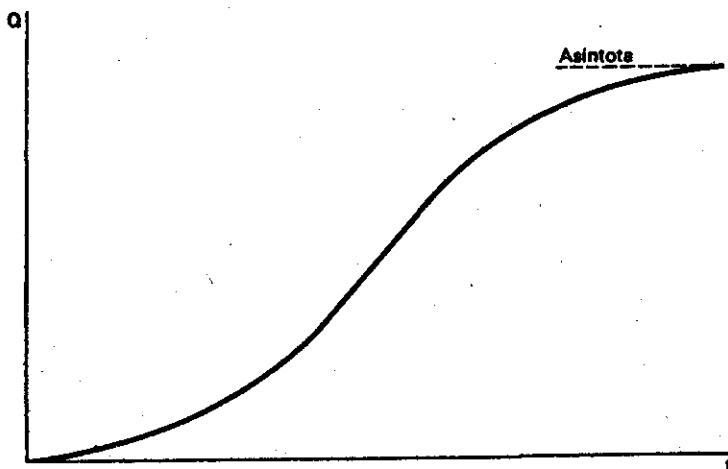


Fig. 3.4. Curva logística.

En química ésta es la curva de una reacción autocatalítica, o sea de una reacción en la cual un producto formado acelera su propia producción. En sociología es la ley de Verhulst (1838), que describe el crecimiento de poblaciones humanas con recursos limitados.

Con todo y ser matemáticamente triviales, estos ejemplos ilustran

un punto que nos interesa ahora, a saber: el hecho de que pueda llegar a ciertas leyes de la naturaleza no sólo sobre la base de la experiencia sino también de manera puramente formal. Las ecuaciones discutidas no significan más que el sistema harto general de ecuaciones (3.1), su desarrollo en serie de Taylor y la aplicación de condiciones adecuadas. En este sentido tales leyes son *a priori*, independientes de su interpretación física, química, biológica, sociológica, etc. En otras palabras, esto muestra la existencia de una teoría general de los sistemas que se ocupa de las características formales de los sistemas; aparecen hechos concretos en aplicaciones especiales, definiendo variables y parámetros. Dicho aun de otra manera, tales ejemplos muestran una uniformidad formal en la naturaleza.

Competencia

Nuestro sistema de ecuaciones también puede indicar competencia entre partes.

El caso más sencillo posible es, una vez más, aquel en que todos los coeficientes $a_i \neq 0$, o sea que el incremento de cada elemento depende sólo de este. Para dos elementos tenemos entonces:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ_1}{dt} &= a_1 Q_1 \\ \frac{dQ_2}{dt} &= a_2 Q_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

o bien:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= c_1 e^{a_1 t} \\ Q_2 &= c_2 e^{a_2 t} \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

Eliminando el tiempo obtenemos:

$$t = \frac{\ln Q_1 - \ln c_1}{a_1} = \frac{\ln Q_2 - \ln c_2}{a_2} \quad (3.19)$$

y

$$Q_1 = b Q_2^\alpha \quad (3.20)$$

con

$$\alpha = a_1/a_2, \quad b = c_1/c_2^\alpha$$

Esta es la ecuación conocida en biología como *ecuación alométrica*. En esta discusión se ha supuesto (3.17 y 3.18) la forma más sencilla de crecimiento de las partes: la exponencial. Sin embargo, la relación alométrica vale también para casos algo más complicados, tales como el crecimiento que sigue la parábola, la curva logística o la función de Gompertz, estricta o aproximadamente (Lumer, 1937).

La ecuación alométrica se aplica a una amplia gama de datos morfológicos, bioquímicos, fisiológicos y filogenéticos. Significa que determinada característica Q_1 puede ser expresada como función exponencial de otra característica Q_2 . Tómese, p. ej., la morfogénesis. La longitud o el peso de determinado órgano, Q_1 , es en general función alométrica del tamaño de otro órgano o de la longitud o el peso totales del organismo en cuestión, Q_2 . El sentido queda claro si escribimos la ecuación (3.17) levemente modificada:

$$\frac{dQ_1}{dt} \cdot \frac{1}{Q_1} \cdot \frac{dQ_2}{dt} \cdot \frac{1}{Q_2} = \alpha, \quad (3.21)$$

o bien:

$$\frac{dQ_1}{dt} = \alpha \cdot \frac{Q_1}{Q_2} \cdot \frac{dQ_2}{dt} \quad (3.22)$$

La ecuación (3.21) enuncia que los ritmos relativos de crecimiento (o sea su incremento calculado como porcentaje del tamaño real) de las partes consideradas, Q_1 y Q_2 , guardan una razón constante durante la vida, o durante un ciclo vital en el cual sea válida la ecuación alométrica. Esta relación, bastante sorprendente (en vista de la complejidad inmensa de los procesos de crecimiento, parecería a primera vista improbable que el crecimiento de partes estuviera gobernado por una ecuación algebraica tan sencilla), es explicada por la ecuación (3.22). De acuerdo con ella, puede interpretarse como resultado de un proceso de distribución. Tómese Q_2 como el organismo entero; entonces la ecuación (3.22) afirma que el órgano Q_1 toma, del incremento resultante del metabolismo del organismo total (dQ_2/dt), una participación que es proporcional

a su razón con respecto a la primera magnitud (Q_1/Q_2). Un coeficiente de partición es α , que indica la capacidad del órgano para captar su parte. Si $a_1 > a_2$, es decir, si la intensidad de crecimiento de Q_1 es mayor que la de Q_2 , entonces $\alpha = a_1/a_2 > 1$; el órgano capta más que otras partes y, así, crece más rápidamente que éstas, o con alometría positiva. A la inversa, si $a_1 < a_2$, o sea $\alpha < 1$, el órgano crece más despacio, o exhibe alometría negativa. Similarmente, la ecuación alométrica se aplica a cambios bioquímicos en el organismo, y a funciones fisiológicas. P. ej., el metabolismo basal aumenta, en vastos grupos de animales, con $\alpha = 2/3$, con respecto al peso corporal si se comparan animales de la misma especie o de especies relacionadas; esto significa que el metabolismo basal es, en general, función de superficie del peso corporal. En algunos casos, tales como las larvas de insectos y los caracoles, $\alpha = 1$, o sea que el metabolismo basal es proporcional al peso mismo.

En sociología, la expresión en cuestión es la *ley de Pareto* (1897) de la distribución del ingreso en una nación, con lo cual $Q_1 = bQ_2^\alpha$, con Q_1 = número de individuos que ganan determinado ingreso, Q_2 = magnitud del ingreso, y b y α constantes. La explicación es análoga a la antes dada, poniendo «ingreso nacional» en vez de «incremento del organismo total», y «capacidades económicas de los individuos en cuestión» en lugar de «constante de distribución».

La situación se complica si se suponen interacciones entre las partes del sistema, si $a_{j \neq i} \neq 0$. Se llega entonces a sistemas de ecuaciones como las estudiadas por Volterra (1931) para la competencia entre especies y, de manera correspondiente, por Spiegelman (1945) para la competencia dentro de un organismo. En vista de que estos casos están cabalmente discutidos en la bibliografía, no entraremos en discusiones detalladas. Baste con mencionar un par de puntos de interés general.

Es una consecuencia interesante el que, en las ecuaciones de Volterra, la competencia entre dos especies por los mismos recursos sea, en cierto sentido, más fatal que una relación predador-presa, que la aniquilación parcial de una especie por la otra. La competencia conduce a fin de cuentas al exterminio de la especie con menor capacidad de crecimiento; una relación predador-presa sólo conduce a oscilación periódica en las abundancias de las especies en cuestión, en torno a un valor medio. Estas relaciones han sido enunciadas

para sistemas biocenóticos, pero bien pudiera ser que tuviesen también implicaciones sociológicas.

Hay que mencionar otro punto de interés filosófico. Si hablamos de «sistemas», aludimos a «totalidades» o «unidades». Parece entonces paradójico que sea introducido con respecto a un todo el concepto de competencia entre sus partes. La verdad es que estas afirmaciones en apariencia contradictorias tocan ambos aspectos esenciales de los sistemas. Cada todo se basa en la competencia entre sus elementos y presupone la «lucha entre partes» (Roux). Es un principio general de organización en sistemas fisicoquímicos sencillos así como en organismos y unidades sociales, y es en última instancia expresión de la *coincidentia oppositorum* que la realidad presenta.

Totalidad, suma, mecanización, centralización

Los conceptos que acabamos de indicar han sido tomados a menudo como descripciones de características de seres vivos nada más, o incluso como prueba del vitalismo. La verdad es que son propiedades formales de los sistemas.

1) Volvamos a suponer que las ecuaciones (3.1) pueden desarrollarse en serie de Taylor:

$$\frac{dQ_1}{dt} = a_{11}Q_1 + a_{12}Q_2 + \dots + a_{1n}Q_n + a_{111}Q_1^2 + \dots \quad (3.23)$$

Vemos que cualquier cambio en alguna magnitud Q_i es función de las cantidades de todos los elementos Q_1 a Q_n . Por otro lado, un cambio en determinada Q_i provoca un cambio en todos los demás elementos y en el sistema total. De modo que el sistema se conduce como un *todo*, y los cambios en cada elemento dependen de todos los demás.

2) Sean ahora nulos los coeficientes de las variables Q_j ($j \neq i$). El sistema de ecuaciones degenera a:

$$\frac{dQ_i}{dt} = a_{i1}Q_i + a_{i11}Q_i^2 + \dots \quad (3.24)$$

Esto significa que un cambio en cada elemento depende sólo de dicho elemento mismo. Entonces cada elemento puede ser considerado independiente de los otros. La variación del complejo total es la suma (física) de las variaciones en sus elementos. Podemos

llamar a este comportamiento *sumatividad física* o *independencia*.

Puede definirse la sumatividad diciendo que es posible constituir paso a paso un complejo juntando los elementos primeros separados; a la inversa, las características del complejo pueden ser analizadas completamente en las de los elementos separados. Esto vale para los complejos que pudiéramos llamar «montones», tales como un montón de ladrillos o de cosas revueltas, o para fuerzas mecánicas, actuantes de acuerdo con el paralelogramo de las fuerzas. No se aplica a los sistemas llamados en alemán *Gestalten*. Tómese el más sencillo ejemplo: tres conductores eléctricos tienen ciertas cargas que pueden medirse por separado en cada uno. Mas si se conectan con alambres, la carga en cada conductor depende de la constelación total y difiere de su carga cuando está aislado.

Aunque esto sea trivial desde el punto de vista de la física, no está de más subrayar el carácter no sumativo de los sistemas físicos y biológicos en vista de que la actitud metodológica ha estado —y sigue así en gran medida— determinada por el programa mecanicista (von Bertalanffy, 1949a, 1960). En un libro de Lord Russell (1948) hallamos un rechazo algo sorprendente del «concepto de organismo». De acuerdo con Russell, tal concepto afirma que las leyes que gobiernan el comportamiento de las partes sólo pueden ser enunciadas considerando el lugar de las partes en el todo. Russell rechaza este punto de vista. Pone el ejemplo de un ojo, cuya función como receptor de luz puede entenderse perfectamente si el ojo está aislado, sin tomar en cuenta más que las reacciones fisicoquímicas internas y los estímulos entrantes y salientes. «El progreso científico se ha hecho por análisis y aislamiento artificial... En todo caso, pues, será prudente adoptar el punto de vista mecanicista como hipótesis de trabajo, que se abandonará sólo cuando haya testimonios claros en contra. Por lo que respecta a los fenómenos biológicos, tales testimonios están completamente ausentes hasta la fecha.» Es cierto que los principios de sumatividad son aplicables al organismo vivo hasta determinado punto. La palpitación de un corazón, la contracción de una preparación de nervio y músculo, los potenciales de acción en un nervio, son casi enteramente iguales si se estudian aislados o en el organismo en conjunto. Esto se aplica a los fenómenos que definiremos más tarde como acontecidos en sistemas parciales altamente «mecanizados». Pero las palabras de Russell son profundamente equivocadas precisamente con respecto a los fenómenos biológicos básicos y primarios. Si se toma

cualquier terreno de fenómenos biológicos, ya sea el desarrollo embrionario, el metabolismo, el crecimiento, la actividad del sistema nervioso, las biocenosis, etc., siempre se hallará que el comportamiento de un elemento es diferente dentro del sistema de como es aislado. No puede sumarse el comportamiento de las partes aisladas y obtener el del todo; hay que tener en cuenta las relaciones entre los varios sistemas subordinados y los sistemas que les están superordinados, a fin de comprender el comportamiento de las partes. El análisis y el aislamiento artificial son útiles, pero en modo alguno suficientes, como métodos de experimentación y teorización en biología.

3) La *sumatividad en sentido matemático* significa que el cambio en el sistema total obedece a una ecuación de la misma forma que las ecuaciones de las partes. Esto sólo es posible cuando las funciones del lado derecho de la ecuación contienen términos lineales nada más; caso trivial.

4) Hay un caso más, que parece desacostumbrado en sistemas físicos pero es común y fundamental en sistemas biológicos, psicológicos y sociológicos. Se trata del caso en que las interacciones entre los elementos disminuyen con el tiempo. En términos de nuestra ecuación modelo básica (3.1), esto quiere decir que los coeficientes de las Q_i no son constantes sino que disminuyen con el tiempo. El caso más sencillo sería:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} a_{ij} = 0 \quad (3.25)$$

En este caso el sistema pasa de un estado de totalidad a un estado de independencia de los elementos. El estado primario es el de un sistema unitario que se va escindiendo gradualmente en cadenas causales independientes. A esto podemos llamarlo *segregación progresiva*.

Por regla general, la organización de todos los físicos, tales como átomos, moléculas o cristales, resulta de la unión de elementos preexistentes. En contraste, la organización de todos biológicos está constituida por diferenciación de un todo original que se segrega en partes. Un ejemplo es la determinación en el desarrollo embrionario, cuando el germen pasa de un estado de equipotencialidad

a un estado en que se comporta como un mosaico o suma de regiones que se desenvuelven independientemente dando órganos definidos. Lo mismo vale en el desarrollo y la evolución del sistema nervioso y de la conducta, partiendo de acciones del cuerpo entero o de grandes regiones y pasando al establecimiento de centros definidos y arcos reflejos localizados, y en otros muchos fenómenos biológicos.

La razón del predominio de la segregación en la naturaleza viviente parece ser que la segregación en sistemas parciales subordinados implica un aumento de complejidad en el sistema. Semejante tránsito hacia un orden superior presupone suministro de energía, y ésta sólo es dada continuamente al sistema si tal sistema es abierto y toma energía del medio circundante. Hemos de volver más adelante a esta cuestión.

En el estado de totalidad, una perturbación del sistema conduce a la introducción de un nuevo estado de equilibrio. Sin embargo, si el sistema está escindido en cadenas causales separadas, éstas marchan independientemente. Mecanización creciente significa determinación creciente de elementos por funciones sólo dependientes de ellos mismos, con la consiguiente pérdida de regulabilidad sustentada en el sistema en conjunto, en virtud de las interrelaciones presentes. Mientras menores se hacen los coeficientes de interacción, mejor pueden desdiseñarse los respectivos términos Q_i , y más parecido a una máquina es el sistema: como una suma de partes independientes.

Este hecho, que puede llamarse «mecanización progresiva», desempeña un importante papel en biología. Parece que lo primario es el comportamiento resultante de la interacción dentro del sistema; secundariamente está la determinación de los elementos a acciones que sólo dependen de ellos, con lo cual se pasa a un comportamiento sumativo. Se dan ejemplos en el desarrollo embrionario: en un principio lo que ocurre con cada región depende de su posición en el todo, de modo que es posible regulación después de perturbación arbitraria; posteriormente las regiones embrionarias quedan determinadas para una evolución fija, para el desarrollo de cierto órgano. Similarmente, en el sistema nervioso hay partes que se tornan centros irremplazables para ciertos funcionamientos, p. ej. reflejos. En el reino biológico, sin embargo, la mecanización nunca es completa; aun cuando el organismo esté en parte mecanizado, no deja de ser un sistema unitario; tal es el fundamento de la

regulación y de la interacción con las cambiantes exigencias del medio circundante. Similares consideraciones son aplicables a las estructuras sociales. En una comunidad primitiva cada miembro puede hacer casi cualquier cosa que pueda esperarse en su conexión con el todo; en una comunidad altamente diferenciada cada miembro está determinado para una actividad o complejo de actividades definidas. Se alcanza el caso extremo en ciertas comunidades de insectos, cuyos individuos, por así decirlo, se han transformado en máquinas destinadas a determinados desempeños. La determinación de los individuos para ser obreras o soldados en algunas comunidades de hormigas, merced a diferencias en la alimentación en ciertas etapas, se parece pasmosamente a la determinación ontogénica de regiones germinales orientadas a determinado destino en su desarrollo.

En este contraste entre totalidad y suma reside la trágica tensión que hay en toda evolución biológica, psicológica o sociológica. El progreso sólo es posible pasando de un estado de totalidad indiferenciada a la diferenciación de partes. Esto implica, sin embargo, que las partes se tornen fijas, dedicadas a tal o cual acción. O sea que la segregación progresiva significa asimismo mecanización progresiva. Y ésta, a su vez, implica pérdida de regulabilidad. Mientras un sistema sea un todo unitario, una perturbación irá seguida del alcanzamiento de un nuevo estado estacionario debido a interacciones dentro del sistema. El sistema se autorregula. No obstante, si el sistema se escinde en cadenas causales independientes, la regulabilidad desaparece. Los procesos parciales seguirán cada uno su camino. Es el comportamiento que encontramos, p. ej., en el desarrollo embrionario, donde la determinación va aparejada a disminución en la regulabilidad.

El progreso sólo es posible por subdivisión de una acción inicialmente unitaria en acciones de partes especializadas. Esto, sin embargo, significa a la vez empobrecimiento, pérdida de posibilidades que aún están al alcance del estado indeterminado. Mientras más partes se especializan de determinado modo, más irremplazables resultan, y la pérdida de partes puede llevar a la desintegración del sistema total. En lenguaje aristotélico, toda evolución, al desplegar alguna potencialidad, aniquila en capullo muchas otras posibilidades. Esto aparece en el desarrollo embrionario así como en la especialización filogenética, o en la especialización en la ciencia o en la vida cotidiana (von Bertalanffy, 1949a, 1960, pp. 42ss).

El comportamiento en conjunto y el comportamiento sumativo, las concepciones unitaria y elementalista, suelen tenerse por antítesis. Pero a menudo se halla que no hay oposición entre los términos, sino transición gradual del comportamiento de conjunto al comportamiento sumativo.

5) Vinculado a éste, hay un principio más. Supóngase que los coeficientes de un elemento p , son grandes en todas las ecuaciones, en tanto que los coeficientes de los demás elementos son considerablemente menores o hasta nulos. En tal caso el sistema puede adquirir este aspecto:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ_1}{dt} &= a_{11}Q_1 + \dots a_{1s}Q_s + \dots \\ \frac{dQ_s}{dt} &= a_{s1}Q_1 + \dots \\ \frac{dQ_n}{dt} &= a_{n1}Q_1 + \dots a_{n1}Q_n + \dots \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

si para simplificar escribimos sólo los miembros lineales.

Hay entonces relaciones que son expresables de varias maneras. Podemos llamar al elemento p_s una *parte conductora*, o decir que el sistema está *centrado* alrededor de p_s . Si los coeficientes a_{is} de p_s en algunas ecuaciones, o en todas, son grandes en tanto que los coeficientes de p_s en su ecuación son pequeños, un cambio exiguo en p_s causará un cambio considerable del sistema total. Así, p_s pudiera denominarse *disparador*. Un pequeño cambio en p_s será «amplificado» en el sistema total. Desde el punto de vista energético, en este caso no encontramos «causalidad de conservación» (*Erhaltungskausalität*), donde vale el principio *causa aequat effectum*, sino «causalidad de instigación» (*Anstosskausalität*) (Mittasch, 1948): un cambio energéticamente insignificante en p_s provoca un cambio considerable en el sistema total.

El principio de centralización es especialmente importante en el reino biológico. La segregación progresiva está a menudo asociada a centralización progresiva, cuya expresión es la evolución, dependiente del tiempo, de una parte conductora, es decir, una combinación de los esquemas (3.25) y (3.26). Al mismo tiempo, el principio de centralización progresiva lo es de individualización progresiva. Puede definirse un «individuo» como un sistema centralizado. Estricto-

tamente hablando, en el dominio biológico éste es un caso límite, al cual sólo hay acercamiento ontogenético y filogenético; el organismo, en virtud de la centralización progresiva, se hace más y más unificado y «más indivisible».

Todos estos hechos se observan en múltiples sistemas. Nicolai Hartmann llega a solicitar centralización para toda «estructura dinámica». Reconoce sólo unas cuantas clases de estructuras, en el reino físico, las de mínimas dimensiones (el átomo como sistema planetario de electrones alrededor de un núcleo) y las de grandes dimensiones (sistemas planetarios con un sol en medio). Desde el punto de vista biológico haríamos hincapié en la mecanización y la centralización progresivas. El estado primitivo es aquel en el que el comportamiento del sistema resulta de las interacciones de partes equipotenciales; progresivamente se verifica la subordinación a partes dominantes. En embriología, p. ej., éstas se llaman organizadores (Spemann); en el sistema nervioso central, las partes empiezan por ser en alto grado equipotenciales, como en los sistemas nerviosos difusos de los animales inferiores; luego se establece la subordinación a centros rectores del sistema nervioso.

O sea que, análogo a la mecanización progresiva, en biología aparece un principio de centralización progresiva, simbolizada por la formación de partes conductoras mediada por el tiempo, o sea una combinación de los esquemas (3.25) y (3.26). Este modo de ver las cosas ilumina un concepto importante pero no fácilmente definible, el de *individuo*. Esta palabra quiere decir «indivisible». Pero ¿será posible llamar «individuo» a una planaria o a una hidra, en vista de que, si estos animales son cortados en muchos pedazos, cada uno regenera un animal completo? Es fácil crear experimentalmente hidras de dos «cabezas», las cuales competirán para atrapar una pulga de agua, si bien no tiene la menor importancia qué lado se la engulla, pues irá a dar al estómago común, donde será digerida para beneficio de todas las partes. Incluso en organismos superiores es dudosa la individualidad, al menos en el desarrollo inicial. No sólo cada mitad de un embrión de erizo de mar dividido, sino también las mitades de un embrión de salamandra se desarrollan dando animales completos; los gemelos idénticos humanos son, por así decirlo, resultado de un experimento de Driesch realizado por la naturaleza. Consideraciones análogas se aplican al comportamiento de animales: en los inferiores puede haber tropotaxia en la acción antagonista de las mitades del cuerpo si están apropiadamente ex-

puestas a estímulos; ascendiendo por la escala evolutiva aparece la centralización creciente; el comportamiento no es resultado de mecanismos parciales de igual jerarquía, sino que lo dominan y unifican los centros máximos del sistema nervioso (cf. von Bertalanffy, 1937; pp. 131ss, 139ss).

Así que, estrictamente hablando, la individualidad biológica no existe; sólo la individualización progresiva en la evolución y el desarrollo, resultante de centralización creciente, por ganar algunas partes un papel dominante y determinar con ello la conducta del conjunto. Aquí el principio de *centralización progresiva* constituye también una *individualización progresiva*. Hay que definir el individuo como un sistema centrado, lo cual de hecho es un caso límite al cual tienden el desarrollo y la evolución, de modo que el organismo se vuelve más unificado e «indivisible» (cf. von Bertalanffy, 1932; pp. 269ss). En el campo psicológico, un fenómeno parecido es el carácter «centrado» de las *Gestalten*, v. gr. en la percepción; tal carácter parece necesario para que una *Gestalt* psíquica se distinga de otras. En contraste con el «principio de ausencia de jerarquía» de la psicología asociativa, Metzger afirma (1941, p. 184) que «cualquier formación, objeto, proceso o experiencia psíquicos, hasta las más simples *Gestalten* de la percepción, exhibe cierta distribución de peso y cierta centralización; hay orden jerárquico, a veces una relación derivada, entre sus partes, lugares, propiedades». Una vez más vale lo mismo en el dominio sociológico: una multitud amorfa no tiene «individualidad»; para que una estructura social se distinga de otras, es necesario el agrupamiento en torno a determinados individuos. Por esta precisa razón, una biocenosis como un lago o un bosque no es un «organismo», ya que un organismo individual siempre está centrado en mayor o menor grado.

El descuido del principio de la mecanización y la centralización progresivas ha conducido muchas veces a seudoproblemas, porque sólo fueron reconocidos los casos límite de elementos independientes y sumativos o, si no, la interacción completa entre elementos equivalentes, y no los grados intermedios, biológicamente importantes. Esto tiene su lugar con respecto a los problemas del «gene» y del «centro nervioso». La genética antigua (no ya la moderna) tendía a considerar la sustancia hereditaria como suma de unidades corpusculares determinantes de las características individuales de los órganos; es evidente que una suma de macromoléculas no puede producir la totalidad organizada del organismo. La respuesta correc-

ta es que el genoma en conjunto produce el organismo en conjunto, pero que ciertos genes determinan preeminentemente la dirección del desarrollo de ciertos caracteres —actúan, pues, como «partes conductoras». Esto queda expresado diciendo que todo rasgo hereditario es codeterminado por muchos genes, quizá por todos, y que todo gene influye no nada más sobre un rasgo sino sobre muchos, acaso sobre el organismo total (poligenia de caracteres y polifenia de genes). Parecidamente, en la función del sistema nervioso hubo sin duda la posibilidad de optar entre una suma de mecanismos para las distintas funciones, o una red nerviosa homogénea. También aquí la concepción correcta es que cualquier función resulta a fin de cuentas de la interacción de todas las partes, pero que algunas partes del sistema nervioso central influyen sobre ella decisivamente y pueden por tanto llamarse «centros» de dicha función.

6) Una formulación más general (pero menos visualizable) de lo que se ha dicho es la siguiente. Si el cambio de Q_i es alguna función F_i de las Q_i y sus derivadas en coordenadas espaciales, tenemos:

$$(2) \quad \text{Si } \frac{\delta F_i}{\delta Q_j} = 0, \quad i \neq j: \text{ «independencia».$$

$$(4) \quad \text{Si } \frac{\delta F_i}{\delta Q_j} = f(t), \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\delta F_i}{\delta Q_j} = 0: \text{ «mecanización progresiva».$$

(5) Si $\frac{\delta F_i}{\delta Q_s} \gg \frac{\delta F_i}{\delta Q_j}, j \neq s$, o incluso: $\frac{\delta F_i}{\delta Q_j} = 0$: Q_s es la «parte dominante».

7) El concepto de sistema esbozado requiere un importante complemento. Los sistemas están frecuentemente estructurados de modo que sus miembros son a su vez sistemas del nivel inmediato inferior. Cada uno de los elementos denotados por Q_1, Q_2, \dots, Q_n es un sistema de elementos $O_{11}, O_{12}, \dots, O_{1n}$, cada uno de los cuales es a su vez definible por ecuaciones parecidas a las de (3.1):

$$\frac{dO_{1i}}{dt} = f_{1i}(O_{11}, O_{12}, \dots, O_{1n}).$$

Tal superposición de sistemas se llama *orden jerárquico*. Para sus niveles vuelven a ser aplicables los aspectos de totalidad y sumatividad, mecanización progresiva, centralización, finalidad, etc.

Semejante estructura jerárquica y combinación en sistemas de orden creciente es característica de la realidad como un todo y tiene fundamental importancia especialmente en biología, psicología y sociología.

8) Es importante la distinción entre *sistemas cerrados y abiertos* que se discutirá en los capítulos VI-VIII.

Finalidad

Como hemos visto, sistemas de ecuaciones del tipo considerado tienen tres clases de soluciones. El sistema en cuestión puede alcanzar asintóticamente un estado estacionario con el correr del tiempo; puede no alcanzar jamás tal estado, o puede haber oscilaciones periódicas. En caso de que el sistema se acerque a un estado estacionario, su variación será expresable no sólo en términos de las condiciones reales sino también en términos de la distancia que lo separe del estado estacionario. Si Q_i^* son las soluciones para el estado estacionario, pueden introducirse nuevas variables:

$$Q_i = Q_i^* - Q_i'$$

de tal manera que:

$$\frac{dQ_1}{dt} = f(Q_1^* - Q_1') (Q_2^* - Q_2') \dots (Q_n^* - Q_n') \quad (3.27)$$

Podemos expresar esto como sigue: en caso de que un sistema se acerque a un estado estacionario, los cambios que se den pueden ser expresados no sólo en términos de condiciones reales sino también en términos de la distancia que los separa del estado de equilibrio; el sistema parece «tender» a un equilibrio que será alcanzado en el porvenir. O bien los acontecimientos pueden expresarse como dependientes de un estado futuro final.

Por largo tiempo se ha sostenido que ciertas formulaciones de la física tienen un carácter en apariencia finalista. Esto se aplica a dos aspectos. Tal teleología se apreciaba especialmente en los *principios de mínimos de la mecánica*. Ya Maupertuis consideraba su principio de mínimo como prueba de que el mundo en el que entre tantos movimientos virtuales es realizado aquel que lleva al máximo efecto con el mínimo esfuerzo, es «el mejor de los mundos» y obra de un creador intencionado. Euler hizo una observa-

ción afin: «Ya que la fábrica del mundo entero es la más eminente y como se originó del creador más sabio, nada se encuentra en el mundo que no exhiba una característica máxima o mínima.» Se discierne un aspecto teleológico parecido en el principio fisicoquímico de Le Châtelier, y en la regla de Lenz en electricidad. Todos estos principios expresan que en caso de perturbación el sistema genera fuerzas que contrarrestan dicha perturbación y restauran el estado de equilibrio; son derivaciones del principio del mínimo esfuerzo. Para cualquier tipo de sistema existen principios homólogos del principio de mínima acción en mecánica; así Volterra (cf. D'Alicona, 1939, pp. 98ss) mostró que puede desarrollarse una dinámica de poblaciones homóloga de la dinámica en mecánica, y en la cual aparece un principio análogo de mínima acción.

El error conceptual de una interpretación antropomórfica es fácil de advertir. El principio de mínima acción y los principios afines resultan simplemente del hecho de que, si un sistema alcanza un estado de equilibrio, las derivadas se anulan; esto implica variables que alcanzan un extremo, mínimo o máximo; sólo cuando éstas son denotadas por términos antropomorfos como efecto, constreñimiento, trabajo, etc. emerge en la acción física una aparente teleología de los procesos físicos (cf. Bavink, 1944).

También puede hablarse de la finalidad en el sentido de *dependencia con respecto al futuro*. Según se ve en la ecuación (3.27), los acontecimientos pueden de hecho ser considerados y descritos como determinados no por las condiciones del momento sino también por el estado final que ha de alcanzarse. En segundo lugar, esta formulación es de naturaleza general; no sólo se aplica a la mecánica sino a cualquier clase de sistema. En tercer lugar, la cuestión ha sido muchas veces mal interpretada en biología y filosofía, lo cual impone no poca importancia a su clarificación.

Para cambiar, tomemos una ecuación de crecimiento formulada por este autor (von Bertalanffy, 1934, y otros lugares). La ecuación es: $l = l^* - (l^* - l_0 e^{-kt})$ (cf. pp. 178 ss), donde l representa la longitud del animal en el tiempo t , l^* la longitud final, l_0 la longitud inicial y k una constante. Se diría que la longitud l del animal en el tiempo t estuviese determinada por el valor final l^* , que no se alcanzará hasta después de un tiempo infinitamente largo. Sin embargo, el estado final (l^*) es sencillamente una condición de extremo obtenida igualando a cero el cociente diferencial, de suerte que desaparezca. Para hacerlo tenemos que empezar por conocer la

ecuación diferencial que determina de hecho el proceso. Esta ecuación es $dl/dt = E - kl$ y afirma que el crecimiento es determinado por una acción encontrada de procesos de anabolismo y catabolismo, con parámetros E y k respectivamente. En esta ecuación el proceso en el tiempo t es determinado sólo por las condiciones actuales y no aparece estado venidero. Igualando a cero, l^* se define por E/k . La fórmula «teleológica» de valor final, pues, sólo es una transformación de la ecuación diferencial que indica condiciones actuales. En otras palabras, la dirección del proceso hacia un estado final no es cosa que difiera de la causalidad, sino otra expresión de ella. El estado final por alcanzarse en el futuro no es *vis a fronte* que atraiga misteriosamente al sistema, sino apenas otra expresión para *vis a tergo* causal. Por esta razón la física usa tanto tales fórmulas de valores finales, pues el caso es matemáticamente claro y nadie atribuye «previsión» antropomórfica a la meta de un sistema físico. Los biólogos, por su parte, tenían con frecuencia tales fórmulas por un tanto inquietantes, ya fuera temiendo algún vitalismo oculto o considerando tal teleología o directividad hacia metas como «prueba» del vitalismo. Pues con respecto a la naturaleza animada, antes que a la inanimada, tendemos a comparar procesos finalistas con el discernimiento humano de la meta, cuando de hecho estamos manejando relaciones obvias y hasta matemáticamente triviales.

Hasta los filósofos han interpretado mal este asunto. De E. von Hartmann a autores modernos como Kafka (1922) y yo mismo, la finalidad fue definida como lo inverso de la causalidad, como dependencia del proceso con respecto al futuro y no a condiciones pasadas. A menudo se alzaban objeciones, pues, de acuerdo con esta concepción, un estado A dependería de un estado venidero B , algo existente de algo no existente (p. ej. Gross, 1930; algo parecido en Schlick). Como hemos visto, esta formulación no significa una inconcebible «acción» de un porvenir inexistente sino, ni más ni menos, una formulación, a veces útil, de un hecho que puede ser expresado en términos de causalidad.

Tipos de finalidad

No pretendemos discutir aquí en detalle el problema de la finalidad, pero no estará de más enumerar varios tipos. Pueden distinguirse, así:

- (1) Teleología estática o adecuación, significando que una disposición parece útil para determinado «propósito». De este modo, un pelaje resulta conveniente para mantener caliente el cuerpo, y otro tanto ocurre con los pelos, las plumas o las capas de grasa en los animales. Las espinas pueden proteger las plantas contra la ingestión por herbívoros, o las coloraciones imitativas y mimetismos resultar ventajosos para proteger a animales contra sus enemigos.
- (2) Teleología dinámica, significando una directividad de procesos. Es posible distinguir aquí diferentes fenómenos que son confundidos a menudo:

(i) Dirección de acontecimientos hacia un estado final que puede ser expresado como si el presente comportamiento dependiera del estado final. Todo sistema que alcanza una condición independiente del tiempo se conduce de esta manera.

(ii) Directividad basada en estructura, significando que una disposición estructural conduce el proceso de tal suerte que es logrado determinado resultado. Tal es, por supuesto, el caso del funcionamiento de máquinas hechas por el hombre y que dan productos o actúan tal como se esperaba. En la naturaleza viviente hallamos un orden estructural de procesos que en su complicación superan ampliamente a todas las máquinas hechas por el hombre. Semejante orden se desprende desde la función de órganos macroscópicos, así el ojo como una especie de cámara y el corazón como una bomba, hasta estructuras celulares microscópicas responsables del metabolismo, la secreción, la excitabilidad, la herencia y así sucesivamente. En tanto que las máquinas hechas por el hombre laboran de tal modo que dan determinados productos o actúan en cierta forma —fabricación de aeroplanos o movimiento de un ferrocarril—, el orden de los procesos en los sistemas vivos es tal que mantiene los sistemas mismos. Una parte importante de estos procesos lo representa la homeostasia (Cannon), es decir, los procesos merced a los cuales se mantiene constante la situación material y energética del organismo. Son ejemplos los mecanismos de termorregulación, de conservación de la presión osmótica del pH, de la concentración de sales, la regulación de la postura, etc. Estas regulaciones están gobernadas,

en gran medida, por mecanismos de retroalimentación. Retroalimentación significa que, de la salida de una máquina, cierta cantidad es devuelta atrás, como «información», a la entrada, de modo que regule ésta y así establezca o dirija la acción de la máquina. Mecanismos de esta índole son bien conocidos en tecnología, p. ej., el regulador de la máquina de vapor, los proyectiles autodirigidos y otros «servomecanismos». Mecanismos de retroalimentación parecen ser responsables de gran parte de las regulaciones orgánicas y fenómenos de homeostasia, tal como lo viene subrayando recientemente la cibernética (Frank *et al.*, 1948; Wiener, 1948).

(iii) Hay, sin embargo, otra base más de las regulaciones orgánicas. Es la equifinalidad, a saber, el hecho de que pueda alcanzarse el mismo estado final partiendo de diferentes condiciones iniciales y por diferentes caminos. Tal resulta ser el caso en los sistemas abiertos, en la medida en que alcanzan un estado uniforme. Parece que la equifinalidad es responsable de la regulación primaria en los sistemas orgánicos, o sea de todas las regulaciones que no pueden basarse en estructuras o mecanismos predeterminados sino que, por el contrario, excluyen tales mecanismos y fueron así tenidas por argumentos en favor del vitalismo.

(iv) Por último está la genuina finalidad o intencionalidad, significando que el comportamiento actual está determinado por previsión de la meta. Tal es el concepto aristotélico original. Presupone que la meta futura está ya presente en el pensamiento y que dirige la acción presente. La verdadera intencionalidad es característica del comportamiento humano y está vinculada a la evolución del simbolismo del lenguaje y los conceptos (von Bertalanffy, 1948a, 1965).

La confusión de estos tipos diferentes de finalidad es uno de los factores responsables de la confusión imperante en epistemología y biología teórica. En el campo de las cosas hechas por el hombre, la adecuación (1) y el funcionamiento teleológico de máquinas (2, *ii*) se deben, por supuesto, a una inteligencia planeadora (2, *iv*). La adecuación en las estructuras orgánicas (1) es de suponerse que puede ser explicada por el juego causal de mutaciones al azar y selección natural. Sin embargo, esta explicación es mucho menos plausible para el origen de los complicadísimos mecanismos y siste-

mas de retroalimentación orgánicos (2, *ii*). El vitalismo es, en resumidas cuentas, el intento de explicar la directividad orgánica (2, *ii* y *iii*) por medio de inteligencia previsoras de la meta (2, *iv*). Esto lleva metodológicamente más allá de los límites de la ciencia natural, y es empíricamente gratuito, ya que aun en los más pasmosos fenómenos de regulación o instinto no hay la menor justificación sino, al contrario, las razones más concretas en contra de suposiciones como la de que, p. ej., un embrión o un insecto están dotados de inteligencia sobrehumana. Una parte importante de los fenómenos que han sido adelantados como «pruebas del vitalismo», tales como la equifinalidad y la anamorfosis, son consecuencias del estado característico del organismo como sistema abierto, y son accesibles, pues, a la interpretación y la teoría científicas.

El isomorfismo en la ciencia

El presente estudio no aspira más que a señalar brevemente la intención general y varios conceptos de la teoría general de los sistemas. Otras tareas serían exponer la teoría en una forma lógico-matemáticamente estricta, o también el mayor desenvolvimiento de los principios válidos para cualquier tipo de sistema. Es un problema concreto. Por ej., la dinámica demográfica es homologable a la dinámica en mecánica (Volterra, cf. D'Ancona, 1939). Aparece un principio de mínima acción en varios campos, en mecánica, en fisicoquímica como el principio de Le Châtelier que —puede probarse— es también válido para sistemas abiertos, en electricidad como regla de Lenz, en teoría de la población siguiendo a Volterra, etc. Se presenta un principio de oscilaciones de relajamiento en los sistemas físicos tanto como en muchos fenómenos biológicos y ciertos modelos de dinámica de poblaciones. En varios campos de la ciencia es un desiderátum una teoría general de las periodicidades. Habrá que afanarse, pues, en pos de principios tales como los de mínima acción, las condiciones de soluciones estacionarias y periódicas (equilibrios y fluctuaciones rítmicas), la existencia de estados uniformes y problemas similares, en forma generalizada con respecto a la física y válida para los sistemas en general.

La teoría general de los sistemas, por tanto, no es un catálogo

de ecuaciones diferenciales bien conocidas, con sus soluciones, sino que plantea problemas nuevos y bien definidos, que en parte no aparecen en física pero tienen importancia básica en campos no físicos. Precisamente por no ocuparse de ellos la física ordinaria, estos problemas han tomado a menudo aire metafísico o vitalista.

La teoría general de los sistemas debe ser además un importante dispositivo regulador en la ciencia. La existencia de leyes de análoga estructura en diferentes campos permite el empleo de modelos más sencillos o mejor conocidos, para fenómenos más complicados y menos tratables. De manera que la teoría general de los sistemas tiene que ser, metodológicamente, un importante medio de controlar y estimular la transferencia de principios de uno a otro campo, y ya no habrá que repetir o triplicar el descubrimiento de los mismos principios en diferentes terrenos, aislados entre sí. Al mismo tiempo, formulando criterios exactos, la teoría general de los sistemas evitará analogías superficiales inútiles para la ciencia y perniciosas en las consecuencias prácticas.

Esto requiere definir hasta qué punto son permisibles y provechosas las «analogías» en la ciencia.

Vimos ya aparecer leyes similares de sistemas en varias ciencias. Lo mismo pasa con fenómenos cuyos principios generales son describibles en lenguaje ordinario aunque no sean formulables en términos matemáticos. Por ej., es difícil hallar procesos más disímiles, fenomenológicamente y en sus mecanismos intrínsecos, que la formación de un animal completo a partir de un germen dividido de erizo de mar o salamandra, el restablecimiento de la función normal en el sistema nervioso central después de quitar o lesionar algunas de sus partes, y la percepción de *Gestalt* en psicología. Con todo, los principios que gobiernan estos diferentes fenómenos exhiben sorprendentes similitudes. O bien, si investigamos la evolución de las lenguas germánicas observamos que, a partir de un lenguaje primitivo, se dieron mutaciones fonéticas paralelas en varias tribus, aunque muy separadas geográficamente: Islandia, las Islas Británicas, la Península Ibérica. Queda con ello excluida la influencia mutua; las lenguas se desarrollaron independientemente después de la separación de las tribus, pero aun así exhiben un paralelismo definido*. El biólogo halla un principio correspondiente en ciertas

* Agradezco al profesor Otto Höfler haberme señalado este fenómeno.

evoluciones. Hay, p. ej., un grupo de solípedos extintos, los titanoterios. Durante el Terciario pasaron de formas pequeñas a gigantes y al aumentar el cuerpo crecieron aún más los cuernos. Una indagación más detallada ha revelado que los titanoterios, procedentes de aquellas formas pequeñas iniciales, se escindieron en varios grupos que evolucionaron independientemente mas no por ello dejaron de adquirir características paralelas. He aquí una interesante semejanza, en el fenómeno de evoluciones paralelas a partir de *orígenes* comunes pero siguiendo cursos independientes: por un lado la evolución independiente de lenguajes tribales; por otro la evolución independiente de grupos dentro de una clase de mamíferos.

En casos sencillos es fácil dar con la razón del isomorfismo. Por ej., la ley exponencial afirma que, dado un complejo de cierto número de entidades, un porcentaje constante de estos elementos se desintegran o se multiplican por unidad de tiempo. De ahí que tal ley sea aplicable al dinero de una cuenta bancaria así como a los átomos de radio, a moléculas, a bacterias o a individuos de una población. La ley logística enuncia que el incremento, exponencial en un principio, está limitado por algunas condiciones restrictivas. Así en una reacción autocatalítica un compuesto cataliza su propia formación, pero como dentro de un recipiente cerrado es finito el número de moléculas, la reacción tendrá que detenerse cuando todas las moléculas se hayan transformado y alcanzar de esta suerte una situación límite. Una población aumenta exponencialmente con número creciente de individuos, pero si el espacio y el alimento están limitados, la cantidad de alimento disponible por cabeza disminuirá; de ahí que no pueda ser ilimitado el incremento numérico sino que acabe por alcanzar un estado uniforme definido como la máxima población compatible con los recursos disponibles. Las líneas férreas ya existentes en una comarca conducen a la intensificación del tráfico y de la industria, lo cual a su vez requiere una red más tupida, hasta que acaba por alcanzarse un estado de saturación; así, los ferrocarriles actúan como los autocatalizadores, acelerando su propio incremento, y su desarrollo sigue la curva autocatalítica. La ley parabólica es expresión de la competencia dentro de un sistema; cada elemento toma su parte de acuerdo con una capacidad expresada por una constante específica. Por tanto, la ley tiene igual forma, ya se aplique a la competencia entre individuos en un sistema económico, según la ley de Pareto,

o a órganos que compitan dentro de un organismo por material nutritivo y exhiban desarrollo alométrico.

Es claro que hay tres requisitos previos para la existencia de isomorfismos en diferentes campos y ciencias. Al parecer, los isomorfismos o leyes descansan en nuestra cognición por un lado y en la realidad por otro. Sin ir más lejos, es fácil escribir una ecuación diferencial complicada, pero hasta expresiones de aire inocente son a veces difíciles de resolver o tienen cuando menos soluciones engorrosas. El número de expresiones matemáticas sencillas que será preferible aplicar para describir fenómenos naturales es limitado. Por esta razón, leyes de idéntica estructura aparecen en campos intrínsecamente diferentes. Lo mismo vale para enunciados en lenguaje ordinario; aquí también el número de esquemas intelectuales es restringido, y serán aplicados a dominios sumamente diferentes.

No obstante, estas leyes y esquemas servirían de poco si el mundo (es decir, la totalidad de los acontecimientos observables) no fuera tal que le resultaran aplicables. Es concebible un mundo caótico o un mundo demasiado complicado para permitir aplicarle los esquemas relativamente sencillos que conseguimos construir con nuestro limitado intelecto. El que no sean así las cosas constituye el requisito previo de posibilidad de la ciencia. La estructura de la realidad es tal que permite la aplicación de nuestras construcciones conceptuales. Nos damos cuenta, sin embargo, de que todas las leyes científicas no representan más que abstracciones e idealizaciones que expresan ciertos aspectos de la realidad. Toda ciencia es una imagen esquematizada de la realidad, en el sentido de que determinada construcción conceptual está inequívocamente vinculada a ciertos rasgos de orden en la realidad; precisamente como los planos de un edificio no son el edificio, ni lo representan en modo alguno cabalmente, con la disposición de los ladrillos y las fuerzas que los retienen juntos, lo cual no es óbice para que exista una correspondencia inequívoca entre lo trazado en el papel y la auténtica construcción de piedra, metal y madera. No se plantea la cuestión de la «verdad» última, es decir, de hasta qué punto el plano de la realidad tal como lo traza la ciencia sea correcto o susceptible de mejoramiento; ni la cuestión de si será expresable en un solo plano —el sistema de la ciencia humana— la estructura de la realidad. Es de suponerse que serían posibles o incluso necesarias diferentes representaciones, al igual que no tiene sentido preguntar si una proyección central o paralela, una sección horizon-

tal o vertical será más «correcta». Estas posibilidades se aprecian en los casos en que lo mismo físicamente «dado» es expresable en diferentes lenguajes —termodinámica y mecánica estadística, p. ej.—, o aun son precisas consideraciones complementarias, así los modelos corpuscular y ondulatorio de la microfísica. Aparte de estas cuestiones, la existencia de la ciencia prueba que es posible expresar ciertos rasgos de orden de la realidad mediante construcciones conceptuales. Un supuesto previo es la existencia de orden en la realidad misma; análogamente —para volver a la ilustración mencionada— a como estamos en condiciones de establecer el plano de una casa o de un cristal, mas no de las piedras volando en una explosión o de las moléculas moviéndose irregularmente en un líquido.

Hay, con todo, una razón más del isomorfismo de leyes en diferentes dominios, que tiene importancia para lo que decimos. En nuestras consideraciones partimos de una definición general de «sistema»: «cierto número de elementos en interacción», representado por el sistema de ecuaciones (3.1). No se hicieron hipótesis ni afirmaciones especiales acerca de la naturaleza del sistema, de sus elementos o de las relaciones existentes entre ellos. No obstante, de esta definición puramente formal de «sistema» se siguen muchas propiedades, en parte expresadas en leyes bien conocidas en varios campos de la ciencia y que en parte conciernen a conceptos previamente tenidos por antropomórficos, vitalistas o metafísicos. El paralelismo de concepciones generales y aun leyes especiales entre diferentes campos es, pues, consecuencia del hecho de que se ocupen de «sistemas» y de que ciertos principios generales se apliquen a sistemas, sin importar su naturaleza. De ahí que principios como los de totalidad y suma, mecanización, orden jerárquico, aproximación a estados uniformes, equifinalidad, etc., aparezcan en muy diferentes disciplinas. El isomorfismo hallado entre diferentes terrenos se funda en la existencia de principios generales de sistemas, de una «teoría general de los sistemas» más o menos bien desarrollada.

Las limitaciones de esta concepción, por otra parte, salen a relucir distinguiendo tres clases o niveles en la descripción de los fenómenos.

Primero están las *analogías*, o sea las similitudes superficiales entre fenómenos que no se corresponden ni en factores causales ni en las leyes pertinentes. De este género son los *simulacra vitae*,

otrora populares, así cuando se comparaba el crecimiento de un organismo con el de un cristal o el de una celda osmótica. Hay parecidos superficiales en uno u otro aspecto, pero puede afirmarse con seguridad que el crecimiento de una planta o de un animal no sigue la pauta del crecimiento de un cristal o de una estructura osmótica, y las leyes pertinentes difieren. Lo mismo pasa con la consideración de una biocenosis (p. ej. un bosque) como un «organismo», cuando existe evidente diferencia entre la unificación de un organismo individual y la vaguedad de una asociación vegetal; o con la comparación entre el desarrollo de una población y el nacimiento, crecimiento, envejecimiento y muerte de un organismo —comparación harto dudosa de ciclos vitales.

Otro nivel son las *homologías*. Están presentes cuando difieren los factores eficientes, pero las leyes respectivas son formalmente idénticas. Semejantes homologías tienen considerable importancia como modelos conceptuales en la ciencia. Se aplican con frecuencia en física. Son ejemplos la consideración del fluir del calor como el fluir de una sustancia, la comparación de la corriente eléctrica con la de un líquido y, en general, el traslado de la noción de gradiente, en un principio hidrodinámica, a potenciales eléctricos, químicos, etc. Sabemos a la perfección, sí, que no hay tal «sustancia calorífica», sino que el calor debe ser interpretado en el sentido de la teoría cinética; no obstante, el modelo permite estipular leyes que son formalmente correctas.

Es de homologías lógicas de lo que se ocupa la presente investigación. Esto es expresable así: si un objeto es un sistema, debe tener ciertas características de los sistemas, sin importar de qué sistema se trate. La homología lógica no sólo permite el isomorfismo en la ciencia sino que, como modelo conceptual, está en situación de dar instrucciones para la consideración correcta y la eventual explicación de fenómenos.

Finalmente, el tercer nivel es la *explicación*, es decir, el enunciado de condiciones y leyes específicas que son válidas para un objeto separado o para una clase de objetos. En lenguaje lógico-matemático esto quiere decir que las funciones generales f de nuestra ecuación (3.1) son sustituidas por funciones especificadas aplicables al caso en cuestión. Toda explicación científica requiere el conocimiento de estas leyes específicas, así como, p. ej., de las leyes del equilibrio químico, del crecimiento de un organismo, del incremento de una

población, etc. Es posible que también leyes específicas exhiban correspondencia formal u homologías en el sentido discutido, pero la estructura de las leyes puede, por supuesto, diferir según los casos.

Las analogías son científicamente inválidas. En cambio, las homologías a menudo proporcionan modelos valiosos; de ahí su amplia aplicación en física. De modo similar, la teoría general de los sistemas puede servir de dispositivo regulador para discernir analogías y homologías, parecidos sin sentido y traslados significativos de modelos. Esta función se aplica particularmente a ciencias que, como la demografía, la sociología y grandes áreas de la biología, no encajan en el marco de la física y la química; no obstante, hay leyes exactas que pueden enunciarse por aplicación de modelos adecuados.

La homología de características de sistemas no implica reducción de un dominio a otro inferior. Pero tampoco se trata de mera metáfora o analogía; es, antes bien, una correspondencia formal fundada en la realidad, en la medida en que puede considerarse constituida de «sistemas» de la índole que sea.

Hablando filosóficamente, la teoría general de los sistemas, en su forma desarrollada, reemplazaría lo que se conoce como «teoría de las categorías» (N. Hartmann, 1942) por un sistema exacto de leyes lógico-matemáticas. Nociones generales aun expresadas en la lengua común y corriente adquirirían la expresión exacta posible sólo en lenguaje matemático.

La unidad de la ciencia

Resumamos así los principales resultados de esta exposición:

a) El análisis de los principios generales de los sistemas muestra que muchos conceptos que a menudo han sido tenidos por antropomórficos, metafísicos o vitalistas son susceptibles de formulación exacta. Son consecuencias de la definición de sistemas o de determinadas condiciones de sistemas.

b) Semejante investigación es un útil requisito previo con respecto a problemas concretos de la ciencia. En particular, conduce a la elucidación de cuestiones que no son tenidas en cuenta en los esquematismos y cuadrículas de los campos especializados. O sea que la teoría de los sistemas debiera ser un recurso importante

en el proceso de desarrollo de nuevas ramas del conocimiento a la categoría de ciencias exactas, de sistemas de leyes matemáticas.

c) Esta investigación es igualmente importante para la filosofía de la ciencia, algunos de cuyos principales problemas adquieren aspectos nuevos y a menudo sorprendentes.

d) El hecho de que ciertos principios se apliquen a los sistemas en general, sin importar la naturaleza de los mismos ni las entidades de que se trate, explica que aparezcan en diferentes campos de la ciencia concepciones y leyes que se corresponden, provocando el notable paralelismo que hay en su desarrollo moderno. Así, conceptos como los de totalidad y suma, mecanización, centralización, orden jerárquico, estados estacionarios y uniformes, equifinalidad, etc., surgen en diferentes campos de la ciencia natural, al igual que en psicología y en sociología.

Estas consideraciones tienen trascendencia con respecto a la cuestión de la unidad de la ciencia. La opinión actual está bien representada por Carnap (1934). Como él dice, la unidad de la ciencia está garantizada por el hecho de que todos los enunciados de la ciencia puedan a fin de cuentas ser expresados en lenguaje físico —en forma de enunciados que vinculen valores cuantitativos a posiciones definidas en un sistema espaciotemporal de coordenadas. En este sentido, todos los *conceptos* que se dirían no físicos, p. ej. nociones específicamente biológicas como las de «especie», «organismo», «fertilización» y así sucesivamente, son definidos por medio de algunos criterios perceptibles: determinaciones cualitativas susceptibles de fisicalización. El lenguaje físico es, pues, el lenguaje universal de la ciencia. La cuestión de si las leyes biológicas serán reducibles a físicas —si las leyes naturales suficientes para explicar todos los fenómenos inorgánicos bastarán también para explicar los fenómenos biológicos— la deja abierta Carnap, aunque inclinándose por una respuesta afirmativa.

Desde nuestro punto de vista, la unidad de la ciencia adquiere un aspecto más concreto y, a la vez, más profundo. También dejamos abierta la cuestión de la «reducción última» de las leyes de la biología (y de los demás ámbitos no físicos) a la física, la cuestión de si se llegará a establecer un sistema hipotético-deductivo que abarque todas las ciencias, de la física a la biología y la sociología. Pero de fijo estamos en condiciones de establecer leyes científicas para los distintos niveles o estratos de la realidad. Y de ahí encontramos, hablando en «modo formal» (Carnap), una correspondencia

o isomorfismo de leyes y esquemas conceptuales en diferentes campos que sustenta la unidad de la ciencia. Hablando en lenguaje «material», esto quiere decir que el mundo (o sea el total de los fenómenos observables) exhibe una uniformidad estructural que se manifiesta por muestras isomorfas de orden en sus diferentes niveles o reinos.

La realidad, concebida de un modo nuevo, se presenta como un tremendo orden jerárquico de entidades organizadas que va, en superposición de numerosos niveles, de los sistemas físicos y químicos a los biológicos y sociológicos. La unidad de la ciencia no es asegurada por una utópica reducción de todas las ciencias a la física y la química, sino por las uniformidades estructurales entre los diferentes niveles de la realidad.

En especial, la brecha entre las ciencias naturales y las sociales, o, por usar las denominaciones alemanas, más expresivas, entre las *Natur* y las *Geisteswissenschaften*, se estrecha grandemente, no en el sentido de una reducción de estas últimas a concepciones biológicas, sino en el sentido de similitudes estructurales. Esta es la causa de la aparición de visiones y nociones generales correspondientes en ambos campos; y tal vez acabe conduciendo al establecimiento de un sistema de leyes en el segundo.

La visión mecanicista plasmó su ideal en el espíritu laplaciano, en la concepción de que todos los fenómenos son resumidamente agregados de acciones fortuitas de unidades físicas elementales. Teóricamente, esta concepción no condujo a ciencias exactas fuera del campo de la física, es decir, a leyes de los niveles máximos de la realidad, el biológico, el psicológico, el sociológico. En la práctica, sus consecuencias han sido fatales para nuestra civilización. La actitud que considera los fenómenos físicos como único patrón de realidad ha llevado a la mecanización del género humano y a la devaluación de valores superiores. El dominio sin tasa de la tecnología física finalmente llevó al mundo a las catastróficas crisis de nuestro tiempo. Luego de echar por tierra el punto de vista mecanicista, cuidamos de no deslizarnos al «biologismo», a considerar los fenómenos mentales, sociológicos y culturales desde un ángulo puramente biológico. Así como el fiscalismo consideraba el organismo viviente como una extraña combinación de aconteceres o máquinas de naturaleza fisicoquímica, el biologismo tiene al hombre por una curiosa especie zoológica y a la sociedad humana por una colmena o granja de cría de equinos. Teóricamente, el

biologismo no ha revelado sus méritos, y ha resultado fatal en materia de consecuencias prácticas. La concepción organísmica no significa el predominio unilateral de concepciones biológicas. Aunque haga hincapié en isomorfismos estructurales generales entre diferentes niveles, asevera al mismo tiempo su autonomía y posesión de leyes específicas.

Opinamos que la elaboración venidera de la teoría general de los sistemas demostrará ser un paso de consideración hacia la unificación de la ciencia. Quizás esté destinada, en la ciencia del futuro, a desempeñar un papel parecido al de la lógica aristotélica en la ciencia de la Antigüedad. La concepción griega del mundo era estática; se consideraba que las cosas reflejaban arquetipos eternos o ideas. De ahí que la clasificación fuese el problema central de la ciencia, cuyo *órganon* fundamental era la definición de la subordinación y la superordinación de conceptos. En la ciencia moderna la interacción dinámica parece ser el problema central en todos los campos de la realidad. La teoría de los sistemas definirá sus principios generales.

IV. Progresos en la teoría general de los sistemas

En vista de que el pensamiento creador es lo más importante que distingue a la gente de los monos hay que tratarlo como un bien más precioso que el oro y que preservarlo con gran cuidado.

A. D. Hall, *A Methodology for Systems Engineering*

Enfoques y metas de la ciencia de los sistemas

Cuando hace unos 40 años inicié mi vida científica, la biología estaba envuelta en la controversia entre mecanicismo y vitalismo. El procedimiento mecanicista consistía esencialmente en resolver el organismo vivo en partes y procesos parciales: el organismo era un agregado de células, la célula lo era de coloides y moléculas orgánicas, el comportamiento era una suma de reflejos condicionados y no condicionados, y así sucesivamente. Los problemas de organización de estas partes al servicio del mantenimiento del organismo, de la regulación consecutiva a perturbaciones, se evitaban; o bien, de acuerdo con la teoría llamada vitalista, se tenían por explicables sólo merced a la acción de factores animoides —duendecillos, dan ganas de decir— que acechaban en la célula o el organismo; lo cual evidentemente era, ni más ni menos, una declaración en quiebra de la ciencia. Ante aquella situación, yo y otros fuimos conducidos al punto de vista llamado organicismo. Significa, en pocas palabras, que los organismos son

cosas organizadas y que, como biólogos, tenemos que averiguar al respecto. Traté de dar forma a este programa organismico en varios estudios sobre el metabolismo, el crecimiento y la biofísica del organismo. Un paso en tal dirección fue la llamada teoría de los sistemas abiertos y los estados uniformes, que es, resumidamente, una expansión de la fisicoquímica, la cinética y la termodinámica ordinarias. Me dio la impresión, no obstante, de que no podía detenerme en el camino que había elegido, y ello me condujo a generalización mayor aun, a lo que llamé «teoría general de los sistemas». La idea viene de muy atrás: la presenté por primera vez en 1937, en el seminario filosófico de Charles Morris en la Universidad de Chicago. Sin embargo, en aquel entonces era mal visto teorizar en biología, y temí lo que el matemático Gauss llamaba «el clamor de los beocios». De modo que guardé mis notas en un cajón y no fue sino hasta después de la guerra cuando aparecieron mis primeras publicaciones sobre el asunto.

Ocurrió entonces algo interesante y sorprendente. Resultó que se había producido un cambio en el clima intelectual y que estaban de moda la construcción de modelos y las generalizaciones abstractas. Más aun: un buen puñado de científicos habían seguido líneas de pensamiento parecidas. O sea que, al fin y al cabo, la teoría general de los sistemas no estaba tan aislada, ni era una idiosincrasia personal en el grado que yo había creído, sino que correspondía a una tendencia del pensamiento moderno.

Hay una porción de progresos novedosos destinados a enfrentarse a las necesidades de una teoría general de los sistemas. Los enumeraremos brevemente:

(1) La cibernética, basada en el principio de retroalimentación o de líneas causales circulares, que proporciona mecanismos para la persecución de metas y el comportamiento autocontrolado.

(2) La teoría de la información, que introdujo el concepto de información como magnitud medible mediante una expresión isomorfa de la entropía negativa en física, y desarrolla los principios de su trasmisión.

(3) La teoría de los juegos, que analiza, con un novedoso armazón matemático, la competencia racional entre dos o más antagonistas en pos de ganancia máxima y pérdida mínima.

(4) La teoría de la decisión, que analiza parecidamente elecciones racionales, dentro de organizaciones humanas, basadas en el examen de una situación dada y de sus posibles consecuencias.

(5) La topología o matemáticas relacionales, incluyendo campos no métricos tales como las teorías de las redes y de las gráficas.

(6) El análisis factorial, o sea el aislamiento, por análisis matemático, de factores en fenómenos multivariantes, en psicología y otros campos.

(7) La teoría general de los sistemas en el sentido más estricto (G.S.T. en inglés), que procura derivar, partiendo de una definición general de «sistema» como complejo de componentes interactuantes, conceptos característicos de totalidades organizadas, tales como interacción, suma, mecanización, centralización, competencia, finalidad, etc., y aplicarlos entonces a fenómenos concretos.

Si bien la teoría de los sistemas en sentido amplio tiene carácter de ciencia básica, existe un correlato en ciencia aplicada, lo que a veces se llama ciencia de los sistemas, a secas. Este dominio está vinculado de cerca a la moderna automatización. A grandes rasgos se distinguen los campos siguientes (Ackoff, 1960; A. D. Hall, 1962):

Ingeniería de sistemas, es decir, la concepción, el planeamiento, la evaluación y la construcción científicas de sistemas hombre-máquina.

Investigación de operaciones, el control científico de sistemas existentes de hombres, máquinas, materiales, dinero, etc.

Ingeniería humana, que es la adaptación científica de sistemas, y especialmente máquinas, con objeto de obtener máxima eficiencia con mínimo costo en dinero y otros gastos.

Un ejemplo muy sencillo de la necesidad de estudio de los «sistemas hombre-máquina» es el viaje aéreo. Quienquiera cruce continentes en *jet* a velocidad increíble teniendo, sin embargo, que pasar incontables horas esperando, haciendo cola, amontonado en los aeropuertos, se dará clara cuenta de que las técnicas físicas del viaje aéreo son de lo mejor, en tanto que las técnicas de «organización» siguen en un nivel primitivísimo.

Con todo y que hay gran traslapamiento, en los diversos campos predominan diferentes concepciones. En la ingeniería de sistemas se emplean la cibernética y la teoría de la información, así como la teoría general de los sistemas en el sentido más estricto. La investigación de operaciones usa instrumentos como la programación lineal y la teoría de los juegos. La ingeniería humana, que se ocupa de las capacidades, limitaciones fisiológicas y variabilidad

de los seres humanos, incluye biomecánica, ingeniería psicológica, factores humanos, etc., en su arsenal.

Este repaso no se ocupa de la ciencia aplicada de los sistemas; remitimos al lector al libro de Hall, excelente texto de ingeniería de sistemas (1962). Conviene, sin embargo, tener presente que el enfoque de sistemas, como concepto novedoso en ciencia, tiene un paralelo cercano en la tecnología.

Los motivos conducentes a la postulación de una teoría general de los sistemas pueden resumirse bajo unos pocos encabezados.

(1) Hasta hace poco, el campo de la ciencia como empresa nomotética —es decir, que trata de establecer un sistema de leyes explicativo y predictivo— coincidía prácticamente con la física teórica. En consecuencia, la realidad física pareció la única otorgada por la ciencia. La consecuencia fue el postulado del reduccionismo, el principio de que la biología, el comportamiento y las ciencias sociales habrían de manipularse de acuerdo con el parangón de la física, y al fin reducirse a conceptos y entidades de nivel físico. En virtud de adelantos en la física misma, las tesis fisicalista y reduccionista se tornaron problemáticas y hasta se manifestaron como prejuicios metafísicos. Las entidades de que trata la física —átomos, partículas elementales, etc.— han resultado ser mucho más ambiguas de lo que se supuso: no son metafísicas piedras de construcción del universo sino modelos conceptuales hartamente complicados, inventados para dar razón de determinados fenómenos de la observación. Por otro lado, las ciencias biológicas, del comportamiento y sociales han salido adelante. A fuerza de tener que ver con estos campos, y de las exigencias de una nueva tecnología, se impuso una *generalización de los conceptos científicos* y de los correspondientes modelos, lo cual llevó al surgimiento de nuevos campos más allá del sistema tradicional de la física.

(2) En los campos biológico, del comportamiento y sociológico, hay problemas esenciales que la ciencia clásica descuidó, o, mejor dicho, que no entraban en sus consideraciones. Si examinamos un organismo vivo, apreciamos un orden pasmoso, organización, mantenimiento en cambio continuo, regulación y aparente teleología. Asimismo, en la conducta humana es imposible prescindir de la persecución de metas y de la intencionalidad, aunque se adopte una posición estrictamente conductista. Ahora bien, conceptos como los de organización, directividad, teleología, etc., sencillamente no tienen cabida en el sistema clásico de la ciencia. De hecho, en

la visión del mundo llamada mecanicista, basada en la física clásica, eran tenidos por ilusorios o metafísicos. Para el biólogo, p. ej., esto significa que precisamente los problemas específicos de la naturaleza viviente parecían caer más allá del alcance legítimo de la ciencia. La aparición de modelos —conceptuales y a veces hasta materiales— que representen semejantes aspectos de interacción multivariable, organización, automantenimiento, directividad, etc., implica la *introducción de nuevas categorías* en el pensamiento y la investigación científicos.

(3) La ciencia clásica se ocupaba ante todo de problemas de dos variables, de cursos causales lineales, de una causa y un efecto, o de unas pocas variables cuando mucho. La mecánica es el ejemplo clásico. Da soluciones perfectas para la atracción entre dos cuerpos celestes, un sol y un planeta, y así permite la predicción exacta de futuras configuraciones y hasta de la existencia de planetas aún no vistos. Pero ya el problema de los tres cuerpos en mecánica es insoluble en principio y sólo puede ser abordado mediante aproximaciones. Existe una situación similar en el campo más moderno de la física atómica (Zacharias, 1957). También aquí son solubles problemas de dos cuerpos, como el de un protón y un electrón, pero cuando los cuerpos se multiplican surgen las dificultades. Numerosos problemas, particularmente en biología y ciencias sociales y del comportamiento, son al fin y al cabo problemas multivariables que requieren nuevos instrumentos conceptuales. Warren Weaver (1948) uno de los fundadores de la teoría de la información, ha señalado esto en palabras muy citadas. La ciencia clásica, afirma, se ocupaba de vías causales lineales, o sea de problemas de dos variables, o de complejidades no organizadas. Estas últimas son tratables mediante métodos estadísticos y se empalman a fin de cuentas con el segundo principio de la termodinámica. Sin embargo, en la física y la biología modernas salen sin cesar al paso *problemas tocantes a la complejidad organizada*, interacciones entre muchas —pero no infinitas— variables, que requieren nuevas herramientas conceptuales.

(4) Lo que se ha dicho no tiene pretensiones metafísicas o filosóficas. No estamos alzando una barrera entre la naturaleza inorgánica y la viviente, que evidentemente no vendría al caso en vista de la existencia de formas intermedias como los virus, las nucleoproteínas y demás unidades que se autoduplican. Tampoco insistimos en que la biología sea en principio «irreducible a la física», lo

cual también andaría descaminado en vista de los tremendos adelantos en la explicación física y química de los procesos vitales. Análogamente, no se supone ninguna barrera entre la biología y las ciencias del comportamiento y de la sociedad. Lo cual, eso sí, no mitiga el hecho de que en los campos citados no haya instrumentos conceptuales adecuados que sirvan para explicar y predecir, tal como sucede en la física y en los múltiples campos de aplicación.

(5) Se diría, pues, que hace falta una expansión de la ciencia para vérselas con esos aspectos que deja fuera la física y que son los que tocan a las características específicas de los fenómenos biológicos, del comportamiento y sociales. Esto equivale a la introducción de *nuevos modelos conceptuales*.

(6) Estas construcciones teóricas ampliadas y generalizadas, estos modelos, son *interdisciplinarios*: trascienden los compartimientos ordinarios de la ciencia, y son aplicables a fenómenos en diferentes campos. Esto conduce al isomorfismo entre modelos, principios generales y aun leyes especiales que aparecen en varios campos.

Resumiendo: la inclusión de las ciencias biológicas, del comportamiento y sociales en la tecnología moderna exige la generalización de conceptos científicos básicos, lo cual implica nuevas categorías de pensamiento científico, en comparación con las de la física tradicional, y los modelos implantados con tal propósito tienen naturaleza interdisciplinaria.

Una importante consideración es que los diversos enfoques enumerados no son monopolistas ni deben ser considerados como tales. Uno de los aspectos importantes de los cambios modernos en el pensamiento científico es la inexistencia de un «sistema universal» único y que lo abarque todo. Cada construcción científica es un modelo que representa determinados aspectos o panoramas de la realidad. Esto incluso vale para la física teórica: lejos de ser una presentación metafísica de la realidad última (como proclamaba el materialismo del pasado y sigue implicando el moderno positivismo), no es sino uno de estos modelos que, según revelan progresos recientes, no es ni exhaustivo ni único. Las varias «teorías de los sistemas» son también modelos que reflejan diferentes aspectos. No se excluyen mutuamente y a menudo se aplican combinadas. Por ej., ciertos fenómenos pueden tornarse susceptibles de exploración científica gracias a la cibernética, otros recurriendo a la teoría general de los sistemas en el sentido más estrecho; acaso en el mismo fenómeno haya aspectos describibles de esta y de otra manera.

Esto, por supuesto, no cierra el paso —sino que más bien la fomenta— a la esperanza de mayor síntesis, que integre y unifique los varios enfoques presentes hacia una teoría de la «totalidad» y la «organización». En verdad, tales síntesis más altas —así entre la termodinámica irreversible y la teoría de la información— van siendo elaboradas poco a poco.

Los métodos en la investigación general de los sistemas

Ashby (1958a) ha esbozado admirablemente dos caminos o métodos generales posibles en el estudio de los sistemas:

Es fácil distinguir dos líneas principales. Una, ya bien desarrollada en manos de von Bertalanffy y sus colaboradores, toma el mundo tal como lo hallamos, examina los varios sistemas que en él se dan —zoológicos, fisiológicos, etc.— y ofrece entonces enunciados acerca de las regularidades que se han hallado válidas. Este método es esencialmente empírico. El segundo método consiste en empezar por la otra punta. En lugar de estudiar primero un sistema, luego otro, después otro más, hay que cambiar de extremo, que considerar el conjunto de todos los sistemas concebibles y entonces reducir el conjunto a dimensiones más razonables. Tal es el método que he seguido recientemente.

Se verá en seguida que todos los estudios sobre sistemas siguen uno u otro de estos métodos, o los combinan. Cada enfoque tiene sus ventajas y sus limitaciones:

(1) El primer método es empírico-intuitivo; tiene la ventaja de mantenerse muy cerca de la realidad y de ser fácil de ilustrar y hasta de verificar mediante ejemplos tomados de los distintos campos de la ciencia. Por otra parte, este enfoque carece de elegancia matemática y de vigor deductivo, y así parecerá ingenuo y no sistemático a las mentes matemáticas.

Con todo, no hay que menoscabar los méritos de este procedimiento empírico-intuitivo.

El presente autor ha enunciado cierto número de «principios de sistemas», parcialmente en el contexto de la teoría biológica, y sin referencia explícita a la «T.G.S.» (von Bertalanffy, 1960a, pp. 37-54), parcialmente en lo que fue designado enfáticamente como «esbozo» de esta teoría (capítulo III). Hay que tomar esto en sentido literal: se trataba de atraer la atención hacia lo deseable

que era semejante campo, y la presentación fue una especie de bosquejo o plano, que ilustraba el enfoque mediante ejemplos sencillos.

Pero se dio el caso de que aquel repaso intuitivo era notablemente completo. Los principios básicos ofrecidos, como los de totalidad, suma, centralización, diferenciación, parte conductora, sistemas cerrados y abiertos, finalidad, equifinalidad, crecimiento en el tiempo, crecimiento relativo, competencia, han sido usados de múltiples maneras (p. ej. en la definición general de sistema: Hall y Fagen, 1956; tipos de crecimiento: Keiter, 1951-52; ingeniería de sistemas: A. D. Hall, 1962; estudios sociales: Hearn, 1958). Salvando variaciones secundarias de terminología, en pos de mayor claridad o impuestas por el tema, no han sido agregados principios de significación comparable —por deseable que esto hubiese sido. Acaso sea aun más significativo que pase otro tanto con consideraciones que no atañen a la obra de quien esto escribe y que, así, no pueden tomarse por indebidamente influidas por éste. El examen atento de estudios como los de Beer (1960) y Kremyanskiy (1960) acerca de principios, de Bradley y Calvin (1956) sobre redes de reacciones químicas, de Haire (1959) acerca del crecimiento de organizaciones, etc., persuadirá de que aplican asimismo «principios de Bertalanffy».

(2) Ashby siguió el camino de la teoría deductiva de los sistemas (1958b). Una exposición más informal que resume el razonamiento de Ashby (1962) se presta particularmente bien al análisis.

Ashby pregunta por el «concepto fundamental de máquina» y responde afirmando que «su estado interno y el estado de sus alrededores define inequívocamente el siguiente estado al que pasará». Si las variables son continuas, esta definición corresponde a la descripción de un sistema dinámico mediante un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias con el tiempo como variable independiente. Sin embargo, tal representación mediante ecuaciones diferenciales es demasiado restringida para una teoría que ha de incluir sistemas biológicos y máquinas calculadoras, donde las discontinuidades están a la orden del día. De modo que la definición moderna es la «máquina con entrada»: es definida por un conjunto S de estados internos, un conjunto I de entradas y un mapa f del conjunto producto $I \times S$ sobre S . La «organización», pues, es definida especificando los estados S de la máquina y sus condiciones I . Si S es un conjunto de productos $S = \prod_i T_i$, con i como partes y T especificado por el mapa f , de acuerdo con Ashby

un sistema «autoorganizador» puede tener dos sentidos, a saber: (1) El sistema comienza con las partes separadas, y éstas cambian luego hacia la formación de conexiones (ejemplo: células del embrión, primero con escaso o ningún efecto una sobre otra, se unen por formación de dendritas y sinapsis hasta constituir el sistema nervioso, de tanta interdependencia). Este primer sentido es el «tránsito de lo no organizado a lo organizado». (2) El segundo sentido es «tránsito de una mala organización a una buena» (ejemplos: un niño, cuya organización cerebral empieza por hacerlo tratar de tocar el fuego, en tanto que una organización nueva lo hace evitarlo; un piloto automático y un avión acoplados primero por retroalimentación positiva catastrófica y luego mejorados). «Ahí la organización es mala. El sistema sería 'autoorganizador' si se hiciera automáticamente un cambio» (cambio de retroalimentación positiva a negativa). Más *«ninguna máquina puede ser autoorganizadora en este sentido»* (subrayado del autor). Pues adaptación (p. ej. la del homeóstato, o de una computadora que se autoprograme) significa que partimos de un conjunto S de estados, y que f cambia a g , de modo que la organización es una variable, p. ej. una función del tiempo $a(t)$ que empieza por tener el valor f y luego el g . Sin embargo, este cambio «no puede ser adscrito a ninguna causa del conjunto S , o sea que tiene que proceder de algún agente externo que actúe sobre el sistema S como entrada» (nosotros subrayamos). En otras palabras, para ser «autoorganizadora» la máquina S debe estar acoplada a otra máquina.

Enunciado conciso que permite apreciar las limitaciones de este enfoque. Convenimos enteramente en que la descripción por ecuaciones diferenciales es no sólo un modo engorroso sino aun en principio inadecuado de enfrentarse a muchos problemas de organización. El autor se daba clara cuenta de ello, al subrayar que un sistema de ecuaciones diferenciales simultáneas no es en modo alguno la formulación más general y que se escoge únicamente con propósitos de ilustración (capítulo III).

Sin embargo, al superar esta limitación Ashby introdujo otra. Su «definición moderna» de sistema como «máquina con entrada» y que reproducimos antes, suplanta el modelo general de sistema por otro, y bastante especial: el cibernético, un sistema abierto a la información pero cerrado con respecto a la transferencia de entropía. Esto se hace palpable cuando la definición es aplicada a «sistemas autoorganizadores». En forma característica, la clase

más importante de éstos no tiene cabida en el modelo de Ashby: los sistemas que se organizan a sí mismos por diferenciación progresiva, evolucionando desde estados de baja complejidad hasta estados de alta. Por supuesto, ésta es la forma más evidente de «autoorganización», ostensible en la ontogenia, probable en la filogenia y de seguro válida también en muchas organizaciones sociales. No es aquí cosa de «buena» (útil, adaptativa) o «mala» organización, que, como subraya atinadamente Ashby, depende de las circunstancias; el aumento de diferenciación y complejidad —útil o no— es un criterio objetivo y al menos en principio susceptible de medición (p. ej. en términos de entropía decreciente, de información). La pretensión de Ashby de que «ninguna máquina puede ser autoorganizadora», más explícitamente, que el cambio «no puede ser adscrito a ninguna causa del conjunto S » sino que «una entrada tiene que proceder de algún agente externo», equivale a la exclusión de los sistemas autodiferenciantes. La razón de que semejantes sistemas no sean aceptables como «máquinas de Ashby» es patente. Los sistemas autodiferenciantes que evolucionan hacia creciente complejidad (entropía decreciente) son, por razones termodinámicas, sólo posibles como sistemas abiertos, como sistemas que importen materia portadora de energía libre en grado que sobrecompense el aumento de entropía debido a procesos irreversibles dentro del sistema («importación de entropía negativa», según la expresión de Schrödinger). Sin embargo, no podemos decir que este cambio «tiene que proceder de algún agente externo, una entrada»; la diferenciación en un embrión en desarrollo y en un organismo se debe a sus leyes internas de organización, y la entrada (p. ej. el suministro de oxígeno, cuantitativamente variable, o la nutrición, que puede variar cualitativamente dentro de una amplia gama) apenas la posibilita energéticamente.

Lo anterior es también ilustrado por ejemplos adicionales ofrecidos por Ashby. Imagínese que una computadora digital esté realizando multiplicaciones al azar; la máquina «evolucionará» hacia número pares (ya que par por par y par por impar dan números pares) y a fin de cuentas sólo «sobrevivirán» ceros. En otra versión, Ashby cita el décimo teorema de Shannon, que afirma que si un canal de corrección tiene capacidad H , puede eliminarse equívoco de magnitud H , pero no más. Ambos ejemplos ilustran el funcionamiento de sistemas cerrados. La «evolución» de la computadora es hacia la desaparición de diferenciación y el establecimiento de homogeneidad

máxima (análoga al segundo principio en sistemas cerrados); análogamente, el teorema de Shannon concierne a sistemas cerrados, a los que no se administra entropía negativa. En comparación con el contenido en información (organización) de un sistema viviente, la materia importada (nutrición, etc.) no porta información sino «ruido». No obstante, su entropía negativa es usada para mantener o hasta aumentar el contenido en información del sistema. Es ésta una situación al parecer no tenida en cuenta por el décimo teorema de Shannon, y es comprensible, ya que Shannon no trata de la transferencia de información en sistemas abiertos con transformación de materia.

En ambos aspectos el organismo vivo (y otros sistemas de conducta o sociales) no es una máquina de Ashby, ya que evoluciona hacia diferenciación e inhomogeneidad crecientes y puede reducir el «ruido» en mayor grado que un canal de comunicación inanimado. En ambos casos se trata de consecuencias del carácter de sistema abierto del organismo.

Dicho sea de paso, es por razones similares por lo que no podemos reemplazar el concepto de «sistema» por el concepto generalizado de «máquina» de Ashby. Aunque sea más holgado que el clásico (máquinas definidas como sistemas con disposición fija de partes y procesos), siguen en pie las objeciones contra una «teoría de máquina» de la vida (von Bertalanffy, 1960, pp. 16-20, y otras partes).

Estas observaciones no pretenden ser una crítica adversa de Ashby en el enfoque deductivo en general; sólo ponen de relieve que no existe un camino de Santiago a la teoría general de los sistemas. Como en cualquier otro campo científico, tendrá que desarrollarse por interacción de procedimientos empíricos, intuitivos y deductivos. Si el enfoque intuitivo deja tanto que deseñar en rigor y compleción lógicos, el deductivo choca con la dificultad de si estarán correctamente elegidos los términos fundamentales. No se trata de un fallo particular de la teoría ni de quienes la trabajan, sino de un fenómeno bien común en la historia de la ciencia; recuérdese, p. ej., el largo debate acerca de cuál magnitud —fuerza o energía— debe considerarse constante en las transformaciones físicas, hasta que se resolvió el punto en favor de $mv^2/2$.

Para quien este escribe, la «T.G.S.» fue concebida como hipótesis de trabajo; como científico que ejerce, ve la función esencial de los modelos teóricos en la explicación, la predicción y el control

de fenómenos hasta ahora inexplorados. Otros, con igual derecho, querrán recalcar la importancia de la actitud axiomática y citarán al efecto ejemplos como la teoría de la probabilidad, las geometrias no euclidianas o —más recientemente— las teorías de la información y de los juegos, desarrolladas primero como campos matemáticos deductivos y luego aplicadas a la física u otras ciencias. No hay por qué disputar en torno a este punto. En ambos casos el peligro está en considerar prematuramente que el modelo teórico es cerrado y definitivo —riesgo particularmente importante en un terreno como el de los sistemas generales, que aún busca a tanteos sus fundamentos correctos.

Adelantos en la teoría general de los sistemas

La cuestión decisiva es la del valor explicativo y predictivo de las «nuevas teorías» que atacan el cúmulo de problemas en torno a la totalidad, la teleología, etc. Por supuesto, el cambio de clima intelectual que lo deja a uno ver nuevos problemas, pasados por alto antes, o ver problemas bajo otra luz, vale en un sentido más por sí mismo que ninguna aplicación distinta y especial. La «revolución copernicana» fue más que la posibilidad de calcular algo mejor el movimiento de los planetas; la relatividad general algo más que la explicación de contadísimos fenómenos físicos recalcitrantes; el darwinismo algo más que una respuesta hipotética a problemas zoológicos: lo que contó fueron los cambios en el marco general de referencia (cf. Rapoport, 1959a). Con todo, la justificación de semejante cambio reside a fin de cuentas en logros específicos que no se hubieran obtenido sin la teoría nueva.

No hay duda de que se han abierto nuevos horizontes, pero a menudo las relaciones con los hechos empíricos siguen siendo tenues. Así, la teoría de la información ha sido saludada como un «adelanto importante», pero fuera del campo tecnológico original sus contribuciones no han pasado de ser escasas. En psicología se limitan hasta ahora a aplicaciones bastante triviales, como en el aprendizaje por repetición, etc. (Rapoport, 1956; Attneave, 1959). Cuando en biología se habla de la «información codificada» en el DNA, y del «desciframiento del código» (o «clave») al ser dilucidada la estructura de los ácidos nucleicos, lo de información es una *façon de parler* antes que la aplicación de la teoría de la información en el sentido técnico desarrollado por Shannon y Weaver (1949).

«La teoría de la información, aunque útil para el proyecto de computadoras y el análisis de redes, hasta ahora no ha hallado lugar significativo en biología» (Bell, 1962). También la teoría de los juegos es un novedoso adelanto matemático que se juzgó de alcance comparable al de la mecánica newtoniana y al de la introducción del cálculo infinitesimal; una vez más, «las aplicaciones son magras y endebles» (Rapoport, 1959a; llamamos urgentemente la atención del lector hacia las discusiones de Rapoport acerca de las teorías de la información y de los juegos, que analizan admirablemente los problemas aquí mencionados). Lo mismo se advierte en la teoría de la decisión, de la cual se esperaba gran provecho para la ciencia aplicada de los sistemas; pero por lo que respecta a los juegos militares y de negocios, de los que tanto se habló, «no ha habido evaluación controlada de sus logros en el adiestramiento, la selección de personal y la demostración» (Ackoff, 1959).

No hay que dejar sin mencionar un peligro de adelantos recientes. La ciencia del pasado (y en parte la actual) estaba dominada por un empirismo unilateral. Sólo se consideraba «científico» en biología (y psicología) el acopio de datos y experimentos; la «teoría» era equiparada a «especulación» o «filosofía», olvidando que el mero acopio de datos, por incesante que sea, no constituye una «ciencia». La consecuencia fue la falta de reconocimiento y apoyo para mejorar el armazón necesariamente teórico, e influencias desfavorables sobre la investigación experimental misma (que se hizo en buena parte cosa de azar, de dar o no en el blanco) (cf. Weiss, 1962a). Se han vuelto las tornas en algunos campos, durante los años recientes. El entusiasmo por los nuevos instrumentos matemáticos y lógicos disponibles ha llevado a una febril «construcción de modelos», como si se tratara de un fin en sí, muchas veces sin hacer caso de los hechos empíricos. Mas la experimentación conceptual al azar no tiene mayores probabilidades de éxito que la experimentación al azar en el laboratorio. En palabras de Ackoff (1959), hay una fundamental propensión errada, en teoría de los juegos (y en otras), a tomar por un «problema» lo que en realidad no es más que un «ejercicio» matemático. No estaría mal recordar la vieja máxima kantiana de que la experiencia sin teoría es ciega, pero la teoría sin experiencia es un juego intelectual, ni más ni menos.

Cambia algo el caso con la cibernética. El modelo que aplica no es nuevo; si bien el enorme progreso del campo data de la

implantación de este nombre (Wiener, 1948), la aplicación del principio de retroalimentación a procesos fisiológicos se remonta a los trabajos de R. Wagner, hace sus buenos 40 años (cf. Kment, 1959). El modelo de retroalimentación y homeostasia se ha aplicado desde entonces a innumerables fenómenos biológicos y —algo menos persuasivamente— en psicología y las ciencias sociales. De acuerdo con Rapoport (1956), la razón del último hecho sería que

de ordinario hay una correlación bien marcada entre el alcance y el acierto de los escritos... La labor atinada se confina a la ingeniería o a aplicaciones más bien triviales; las formulaciones ambiciosas no salen de la vaguedad.

Ni que decir tiene, éste es un riesgo perenne de todos los enfoques de la teoría general de los sistemas; es claro que se abre un nuevo dominio al pensamiento, pero es difícil navegar entre la Escila de lo trivial y el Caribdis de confundir los neologismos con explicaciones.

El siguiente repaso se limita a la teoría general de los sistemas «clásica» —no en el sentido de que pretenda tener ninguna prioridad o excelencia, sino en el de que sus modelos no salen de las lindes de las matemáticas «clásicas», contrastadas con las «nuevas» de las teorías de los juegos, las redes, la información, etc. No quiere esto decir que la teoría sea mera aplicación de las matemáticas ordinarias. Por el contrario, el concepto de *sistema* plantea problemas que en parte están aún lejos de haber sido resueltos. En otro tiempo, problemas de sistemas condujeron a importantes adelantos matemáticos, como la teoría de Volterra de las ecuaciones integro-diferenciales, de sistemas con «memoria» cuyo comportamiento depende no sólo de las condiciones actuales sino de la historia previa. Hoy por hoy, importantes problemas esperan adelantos, p. ej. una *teoría general de las ecuaciones diferenciales no lineales*, de los estados uniformes y los fenómenos rítmicos, un principio generalizado de mínima acción, la definición termodinámica de los estados uniformes, etc.

Por supuesto, no viene al caso el que la indagación haya o no llevado el rótulo de «teoría general de los sistemas». No pretendemos hacer una reseña completa, ni menos exhaustiva. La intención de este repaso estará cumplida si sirve como una especie de guía de las investigaciones hechas en el campo y de las áreas que parecen prometedoras para trabajos venideros.

SISTEMAS ABIERTOS. La teoría de los sistemas abiertos es una importante generalización de la teoría física, la cinética y la termodinámica. Ha conducido a nuevos principios y discernimientos, tales como el principio de equifinalidad, la generalización del segundo principio de la termodinámica, el posible incremento de orden en sistemas abiertos, la manifestación de fenómenos periódicos por exceso o falso inicio, etc.

Las extensas labores en biología y campos afines se examinan en parte en los capítulos v-vii. (Para mayor discusión, cf. también Gray y White, 1957; Jung, 1956; Morchio, 1956; Netter, 1953, 1959.)

Más allá del organismo como individuo, también se emplean principios de sistemas de la dinámica de poblaciones y en teoría ecológica (revisión: J. R. Bray, 1958). La ecología dinámica, es decir, la sucesión y la culminación de poblaciones vegetales, es un campo muy cultivado que, sin embargo, tiende a resbalar hacia el verbalismo y el debate terminológico. El enfoque de sistemas parece ofrecer un nuevo punto de vista. Whittaker (1953) ha descrito la sucesión de comunidades vegetales hacia la formación de una culminación o clímax, en términos de sistemas abiertos y equifinalidad. De acuerdo con este autor, el hecho de que se generen formaciones culminantes iguales a partir de vegetaciones iniciales diferentes constituye un ejemplo notorio de equifinalidad, donde, por añadidura, el grado de independencia de las condiciones iniciales y de curso de desarrollo es superior al que se da en un organismo único. Patten (1959) ha expuesto un análisis cuantitativo sobre la base de sistemas abiertos, en términos de la producción de biomasa, con culminación como estado uniforme.

El concepto de sistema abierto también ha hallado aplicación en las ciencias de la Tierra, en geomorfología (Chorley, 1964), y en meteorología (Thompson, 1961), merced a una comparación detallada entre conceptos meteorológicos modernos y el concepto organismico de von Bertalanffy en biología. Cabe recordar que ya Prigogine, en su clásica obra (1947), mencionó la meteorología como un posible campo de aplicación de los sistemas abiertos.

CRECIMIENTO EN EL TIEMPO. Las formas más sencillas de crecimiento, las cuales, por esta razón, se prestan mejor a exhibir el isomorfismo entre leyes en diferentes campos, son la exponencial y la logística. Entre otros muchos, son ejemplos el incremento del conocimiento

del número de especies animales (Gessner, 1952), las publicaciones sobre la drosófila (Hersch, 1942), y las compañías manufactureras (Haire, 1959). Boulding (1956a) y Keiter (1951-52) han hecho hincapié en una teoría general del crecimiento.

La teoría del crecimiento animal según von Bertalanffy (y otros) —la cual, por usar parámetros fisiológicos totales («anabolismo», «catabolismo»), puede subsumirse bajo el encabezado de la «G.S.T.» no menos que bajo el de la biofísica— ha sido revisada en cuanto a sus varias aplicaciones (von Bertalanffy, 1960b).

CRECIMIENTO RELATIVO. Otro principio de gran sencillez y generalidad atañe al crecimiento relativo de los componentes de un sistema. La relación simple del incremento alométrico se aplica a muchos fenómenos de crecimiento en biología (morfología, bioquímica, fisiología, evolución).

Una relación análoga se da en los fenómenos sociales. La diferenciación social y la división del trabajo en las sociedades primitivas, así como el proceso de urbanización (o sea el crecimiento de las ciudades en comparación con la población rural), sigue la ecuación alométrica. La aplicación de esta última ofrece una medida cuantitativa de la organización y el desarrollo sociales, susceptible de reemplazar los habituales juicios intuitivos (Naroll y Bertalanffy, 1956). Se diría que el mismo principio es aplicable a la multiplicación del equipo regente en comparación con la del número de empleados en las compañías manufactureras (Haire, 1959).

COMPETENCIA Y FENÓMENOS AFINES. Los trabajos sobre la dinámica de poblaciones de Volterra, Lotka, Gause y otros figuran entre los clásicos de la «T.G.S.», pues fueron los primeros en mostrar la posibilidad de desarrollar modelos conceptuales para fenómenos tales como la «lucha por la existencia», susceptibles de prueba empírica. La dinámica de poblaciones y la genética de poblaciones, que está relacionada, ya se han convertido en importantes campos de investigación biológica.

Es importante advertir que la investigación de este género no pertenece sólo a la biología básica sino también a la aplicada. Es el caso de la biología pesquera, donde se usan modelos teóricos a fin de establecer condiciones óptimas para la explotación del mar (examen de los modelos más importantes: Watt, 1958). El modelo dinámico más acabado se debe a Beverton y Holt (1957;

resumen en Holt, s.f.), para poblaciones de peces explotadas comercialmente, pero sin duda con mayores aplicaciones posibles. Este modelo toma en cuenta el reclutamiento (el ingreso de individuos a la población), el crecimiento (supuesto conforme a la ecuación de crecimiento según Bertalanffy), la captura (por explotación) y la mortalidad natural. El valor práctico de este modelo lo ilustra el hecho de que haya sido adoptado para fines de rutina por la Food and Agriculture Organization de las Naciones Unidas, el British Ministry of Agriculture and Fisheries y otros organismos oficiales.

Los estudios de Richardson acerca de las carreras armamentistas (cf. Rapoport, 1957, 1960), con todo y sus limitaciones, muestran de modo impresionante la posible repercusión del concepto de sistema sobre el más vital de los cuidados en nuestro tiempo. Si las consideraciones racionales y científicas han de contar algo, hé aquí un camino para rechazar frases hechas, como *si vis pacem para bellum*.

Las expresiones usadas en dinámica de poblaciones y «lucha por la existencia» biológica, en econometría, en el estudio de las carreras armamentistas (y de otras índoles), pertenecen —todas— a la misma familia de ecuaciones (el sistema discutido en el capítulo III). Sería muy interesante y provechosa la comparación sistemática y el estudio de estos paralelismos (cf. también Rapoport, 1957, p. 88). Puede sospecharse, p. ej., que las leyes que rigen los ciclos de negocios y las de las fluctuaciones de población, de acuerdo con Volterra, proceden de condiciones similares de competencia e interacción en el sistema.

De una manera no matemática, Boulding (1953) ha discutido lo que llama «leyes férreas» de las organizaciones sociales: la ley malthusiana, la ley de las dimensiones óptimas de las organizaciones, la existencia de ciclos, la ley del oligopolio, etc.

INGENIERÍA DE SISTEMAS. El interés teórico de la ingeniería de sistemas y la investigación de operaciones recae en el hecho de que sea posible someter al análisis de sistemas entidades cuyos componentes son de lo más heterogéneos: hombres, máquinas, edificios, valores monetarios y de otros, insumo de materia prima, salida de productos y otras muchas cosas.

Tal como se mencionó ya, la ingeniería de sistemas emplea la metodología de la cibernética, la teoría de la información, el análisis de redes, diagramas de flujo y de bloques, etc. También intervienen consideraciones de la «T.G.S.» (A. D. Hall, 1962). Los primeros enfoques se ocupan de aspectos estructurados, tipo máquina (decisiones de sí o no en el caso de la teoría de la información); sería de suponerse que los aspectos de la «T.G.S.» *ganarán en importancia* con los aspectos dinámicos, las organizaciones flexibles, etcétera.

TEORÍA DE LA PERSONALIDAD. Si bien se teoriza inmensamente acerca de la función neural y psicológica, siguiendo la línea cibernética fundada en la comparación entre cerebro y computadora, pocas veces se ha intentado aplicar la «T.G.S.» en el sentido más estrecho a la teoría de la conducta humana (p. ej. Krech, 1956; Menninger, 1957), que para los presentes fines puede casi igualarse a la teoría de la personalidad.

Hay que tener presente desde el principio que hoy por hoy la teoría de la personalidad es un campo de batalla entre teorías encontradas y controvertibles. Hall y Lindzey (1957, p. 71) afirman con razón: «Todas las teorías del comportamiento son muy poca cosa y todas dejan mucho que desear por el lado de la prueba científica» —y esto en un libro de cerca de 600 páginas dedicado a las teorías de la personalidad.

No es cosa, pues, de esperar que la «T.G.S.» ofrezca soluciones donde los teóricos de la personalidad, de Freud y Jung a la multitud de autores modernos, no acertaron. La teoría resultará valiosa si abre nuevos panoramas y puntos de vista susceptibles de aplicación experimental y práctica. Tal parece ser el caso. Hay un buen grupo de psicólogos que aceptan una teoría organísmica de la personalidad. Goldstein y Maslow son representantes bien conocidos.

Por supuesto, hay que empezar por preguntar si la «T.G.S.» no será más que nunca un símil fisicalista, inaplicable a los fenómenos psíquicos, y además si semejante modelo tendrá valor explicativo cuando las variables pertinentes no puedan ser definidas cuantitativamente, como suele acontecer con los fenómenos psicológicos.

(1) La respuesta a la primera pregunta parece ser que el concepto de sistema es lo bastante abstracto y general para permitir su aplicación a entidades de cualquier denominación. Las nociones de «equilibrio», «homeostasia», «retroalimentación», «stress», etc.,

serán de origen tecnológico o fisiológico, pero aplicables más o menos bien a fenómenos psicológicos. Los teóricos de sistemas coinciden en que el concepto de «sistema» no está limitado a entidades materiales sino que puede aplicarse a cualquier «todo» que consista en «componentes» que interactúen.

(2) Si la cuantificación es imposible, e inclusive si los componentes de un sistema están mal definidos, puede al menos esperarse que algunos principios sean aplicables cualitativamente al total *qua* sistema. Al menos se llegará a una «explicación en principio» (véase más adelante).

Teniendo presentes estas limitaciones, un concepto que quizá demuestre tener naturaleza esencial es la noción organísmica del organismo como sistema espontáneamente activo. En palabras del presente autor:

Aun bajo condiciones externas constantes y en ausencia de estímulos externos, el organismo no es un sistema pasivo sino básicamente activo. Esto se aplica en particular a la función del sistema nervioso y al comportamiento. Se diría que la actividad interna, antes que la reacción a estímulos, es fundamental. Esto puede mostrarse con respecto tanto a la evolución en los animales inferiores como al desarrollo, así en los primeros movimientos de embriones y fetos (von Bertalanffy, 1960a.)

Esto está de acuerdo con lo que von Holst ha llamado «nueva concepción» del sistema nervioso, basada en el hecho de que las actividades locomotoras primitivas son causadas por automatismos centrales que no requieren estímulos externos. De esta suerte, tales movimientos persisten, p. ej., aun después de cortar la conexión entre nervios motores y sensitivos. El reflejo en sentido clásico deja de ser la unidad básica de la conducta; se trata de un mecanismo regulador superpuesto a actividades primitivas, automáticas. Un concepto afín es fundamental en la teoría del instinto. Según Lorenz, los mecanismos desencadenantes innatos (I.R.N. en inglés) desempeñan un papel dominante y a veces se manifiestan sin estímulo externo (reacciones *in vacuo*): un pájaro que carezca de material para hacer su nido ejecuta a veces en el aire los movimientos de dicha elaboración. Estas consideraciones caen dentro de la estructura de lo que Hebb (1955) llamó «S.N.C. conceptual de 1930-1950». Los más recientes conocimientos sobre los sistemas activadores del cerebro hacen otro hincapié —y con abundancia de testimonios

experimentales— en el mismo concepto básico de la actividad autónoma del S.N.C.

La significación de estos conceptos se vuelve evidente cuando consideramos que contrastan de modo fundamental con el esquema ordinario de estímulo-respuesta, que supone que el organismo es un sistema esencialmente reactivo que responde, como un autómeta, a estímulos externos. El predominio del esquema E-R en la psicología contemporánea no necesita ser subrayado, y se vincula evidentemente al *Zeitgeist* de una sociedad altamente mecanizada. Este principio sustenta teorías psicológicas que por todas las otras partes se oponen, p. ej. la psicología conductista y el psicoanálisis. De acuerdo con Freud, la tendencia suprema del organismo es quitarse de encima tensiones y pulsiones y reposar en un estado de equilibrio regido por el «principio de estabilidad» que tomó Freud del filósofo alemán Fechner. Así, el comportamiento neurótico y psicótico es un mecanismo de defensa, más o menos efectivo o fallido, que tiende a restaurar algún tipo de equilibrio (según el análisis por D. Rapaport, 1960, de la estructura de la teoría psicoanalítica: puntos de vista «económico» y «adaptativo»).

Charlotte Bühler (1959), bien conocida psicóloga de niños, ha resumido felizmente la situación teórica:

En el modelo psicoanalítico fundamental hay sólo una tendencia 'básica, hacia la *satisfacción de necesidades* o la *reducción de tensiones*... Las teorías biológicas que hoy subrayan la «espontaneidad» de la actividad del organismo, debida a su energía acumulada. El funcionamiento autónomo del organismo, su «impulso a realizar determinados movimientos», es cosa en la que insiste Bertalanffy... Estos conceptos representan *una completa revisión del principio original de homeostasia*, que insistía únicamente en la tendencia al equilibrio. Fue con el principio original de la homeostasia con el cual el psicoanálisis identificó su teoría de la descarga de tensiones como única tendencia primaria. (Subrayados en parte nuestros.)

En una palabra, podemos definir nuestro punto de vista como «más allá del principio homeostático»:

- (1) El esquema E-R no cubre los terrenos del juego, las actividades exploratorias, la creatividad, la autorrealización, etc.
- (2) El esquema económico no cubre los logros específicamente

humanos —la mayor parte de lo que aproximadamente se designa como «cultura humana».

(3) El principio de equilibrio no tiene en cuenta que las actividades psicológicas y de comportamiento son más que relajamientos de tensiones; lejos de establecer un estado óptimo, estos últimos pueden acarrear trastornos de índole psicótica, así, p. ej., en los experimentos de privación sensoria.

Se diría que el modelo de E-R y psicoanalítico es una imagen muy irreal de la naturaleza humana y, en sus consecuencias, bastante peligrosa. Precisamente lo que tenemos por logros específicamente humanos es difícil de subsumir bajo el esquema utilitario de homeostasia y estímulo-respuesta. Podrá decirse que el alpinismo, la composición de sonatas o de poemas líricos, son «homeostasia psicológica» —y se ha dicho—, pero a riesgo de que este concepto fisiológico bien definido pierda todo significado. Más aun, si el principio del mantenimiento homeostático es tomado como regla de oro del comportamiento, el individuo llamado bien ajustado será la meta última, un robot bien aceitado que se mantenga en óptima homeostasia biológica, psicológica y social. He aquí un «mundo feliz», que para más de cuatro no constituye el estado ideal de la humanidad. Además, tampoco hay que perturbar el precario equilibrio mental: en lo que irónicamente se denomina educación progresiva, hay que afanarse por no sobrecargar al niño, no imponer restricciones y minimizar las influencias directoras, lo cual trae como resultado una cosecha de ignorantes y de delincuentes juveniles sin precedente.

En contraste con la teoría habitual, puede bien mantenerse que no solamente esfuerzos y tensiones llegan a ser neurotógenos o aun psicotógenos, sino asimismo la liberación igualmente completa de estímulos, y el consiguiente vacío mental. Esto es verificado experimentalmente en los estudios de privación sensoria: los sujetos, aislados de todo estímulo externo, en pocas horas sucumben a la llamada psicosis modelo, con alucinaciones, angustia insufrible, etc. Clínicamente es lo mismo que cuando el aislamiento conduce a la psicosis del prisionero y a la exacerbación de la enfermedad mental en reclusión. En contraste, el máximo *stress* no produce necesariamente trastornos mentales. De ser cierta la teoría acostumbrada, Europa durante la Guerra Mundial y después, con sus extremas tensiones fisiológicas y psicológicas, habría sido un manicomio gigantesco. La realidad es que no hubo aumento estadístico ni

en neurosis ni en perturbaciones psicóticas, aparte de trastornos agudos fáciles de explicar, como la neurosis de combate (capítulo IX).

Llegamos con ello a la concepción de que buena parte del comportamiento biológico y humano cae más allá de los principios de utilidad, homeostasia y estímulo-respuesta, y de que es precisamente esto lo característico de las actividades humanas y culturales. Esta nueva visión abre perspectivas no sólo en teoría sino en la práctica, para la higiene mental, la educación y la sociedad en general (ver capítulo IX).

Lo dicho puede expresarse también en términos filosóficos. Si los existencialistas hablan de la vacuidad y sinsentido de la vida, si ven en ella una fuente no ya de angustia sino de positiva enfermedad mental, el punto de vista es esencialmente el mismo: que el comportamiento no es sólo cosa de satisfacción de impulsos biológicos y de mantener el equilibrio psicológico y social, sino que las cosas son más complicadas. Si la vida se hace insoportablemente vacía en una sociedad industrializada, ¿qué le queda a la persona más que generar una neurosis? El principio, que pudiera llamarse, sin rigor, actividad espontánea del organismo psicofísico, es una formulación más realista de lo que los existencialistas quieren decir en su lenguaje a menudo tan oscuro. Y si teóricos de la personalidad como Maslow o Gardner Murphy hablan de autorrealización como meta humana, se trata una vez más de una expresión un tanto pomposa de lo mismo.

HISTORIA TEÓRICA. Llegamos a esas entidades supremas y mal definidas que se llaman culturas y civilizaciones humanas. Es el campo que se acostumbra llamar «filosofía de la historia». Quizá valiese más hablar de «historia teórica» —en pañales, ni que decir tiene. Este nombre expresa el propósito de establecer un nexo entre «ciencia» y «humanidades», más en particular entre las ciencias sociales y la historia.

Se entiende, por supuesto, que las técnicas de la sociología y la historia difieren por completo (encuestas, análisis estadístico, frente a estudios en archivos, testimonio interno de restos históricos, etc.). Con todo, el objeto de estudio es en el fondo el mismo. La sociología se ocupa ante todo de ver en sección transversal en el tiempo cómo son las sociedades humanas; la historia estudia «longitudinalmente» cómo las sociedades *devienen* y se desarrollan.

El objeto y las técnicas de estudio justifican de sobra la diferenciación práctica, pero no está nada claro que justifiquen filosofías fundamentalmente diferentes.

Estas últimas palabras implican la cuestión de las construcciones en la historia, como las que presentaron a lo grande Vico, Hegel, Marx, Spengler o Toynbee. Los historiadores profesionales las ven, en el mejor de los casos, como poesía; en el peor, como fantasías que encajan, con obsesión paranoide, los hechos de la historia en el lecho de Procusto de una teoría. Diríase que la historia podría aprender de los teóricos de los sistemas, si no soluciones últimas, al menos una actitud metodológica más sana. Problemas hasta aquí tenidos por filosóficos o metafísicos se logran definir en su sentido científico, haciendo intervenir de paso algunos interesantes adelantos recientes (p. ej. la teoría de los juegos).

La crítica empírica cae fuera del alcance del presente estudio. Por ej., Geyl (1958) y otros muchos han analizado evidentes deformaciones de acontecimientos históricos en la obra de Toynbee, y hasta el lector no especialista compila con facilidad una lista de falacias, sobre todo a partir de los últimos volúmenes, inspirados por el Espíritu Santo, del *magnum opus* de Toynbee. Pero el problema va más allá de los errores de hecho o interpretación, o aun de la cuestión de los méritos de las teorías de Marx, Spengler o Toynbee: lo principal es si modelos y leyes serán admisibles en la historia.

Muchos sostienen que no. Es el concepto del método «nomotético» en la ciencia y del método «idiográfico» en la historia. En tanto que la ciencia, en menor o mayor grado, consigue establecer «leyes» para los acontecimientos naturales, la historia, ocupada de acontecimientos humanos de enorme complejidad en causas y consecuencias, presumiblemente determinados por libres decisiones de individuos, apenas alcanza a describir, más o menos satisfactoriamente, lo que ocurrió en el pasado.

Aquí el metodólogo hace el primer comentario. En la actitud que hemos esbozado, la historia académica condena las construcciones en la historia por «intuitivas», «contrarias a los hechos», «arbitrarias», etc. Y no hay duda de que tal crítica escuece bastante a un Spengler o un Toynbee. Algo menos convincente resulta si se considera la labor de la historiografía ordinaria. Por ejemplo, el historiador holandés Peter Geyl, que extrajo de consideraciones metodológicas un vigoroso alegato contra Toynbee, es autor asimismo de un brillante libro sobre Napoleón (1949), en el que concluye

que hay cosa de una docena de interpretaciones diferentes —*modelos*, bien podríamos decir— del carácter y la vida de Napoleón, sin salir de la historia académica y fundadas todas en «hechos» (ya que el período napoleónico es de los mejor documentados), si bien todas se contradicen palmariamente. Van, a grandes rasgos, desde las que ven a Napoleón como brutal tirano y enemigo egoísta de la libertad humana, hasta la visión de Napoleón como sapiente planeador de una Europa unificada. Si uno es estudioso de Napoleón (como lo es, en no muy gran medida, quien esto escribe), es fácil traer a cuento algunos documentos originales que refuten conceptos errados que figuran inclusive en historias muy conocidas y utilizadas. Pongamos las cartas sobre la mesa: si hasta una figura como Napoleón, no muy distante en el tiempo y con la mejor documentación histórica, puede interpretarse de modos contradictorios, no se puede criticar a los «filósofos de la historia» por su proceder intuitivo, su sesgo subjetivo, etc., al enfrentarse al enorme fenómeno de la historia universal. En los dos casos se trata de un modelo conceptual que siempre representará algunos aspectos nada más, y por esa razón será unilateral y hasta torcido. O sea que la construcción de modelos conceptuales en la historia no sólo es permisible sino que, de hecho, constituye la base de cualquier interpretación histórica, diferenciada de la mera enumeración de datos —la crónica o los anales.

Si se concede esto, la antítesis entre los procedimientos nomotético e idiográfico se reduce a lo que los psicólogos gustan de llamar actitudes «molecular» y «molar». Pueden analizarse los acontecimientos dentro de un todo complejo —distintas reacciones químicas en un organismo, p. ej., percepciones en la psique— o pueden buscarse leyes de conjunto que gobiernen la totalidad, así el crecimiento y desenvolvimiento en el primer caso, la personalidad en el segundo. En términos de historia, esto implica el estudio detallado de individuos, tratados, obras de arte, causas y efectos singulares, etc., o de fenómenos totales, con la esperanza de descubrir grandes leyes. Hay, por supuesto, todos los términos medios entre la primera y la segunda consideraciones; los extremos serían ilustrados por Carlyle y su culto al héroe y, en el otro polo, Tolstoi (que era un «historiador teórico» mucho más grande de lo que se acostumbra admitir).

De modo que la cuestión de la «historia teórica» es sobre todo la de los modelos «molares» en tal campo, y esto es lo que son

las construcciones de la historia cuando se las limpia de encajes filosóficos.

La evaluación de estos modelos debe seguir las reglas generales de la verificación o la falsificación. Está, primero, la consideración de bases empíricas. En este caso particular, equivale a preguntar si un número limitado de civilizaciones —20 o cosa así, cuando más— bastará o no para servir de muestra representativa a fin de establecer generalizaciones justificadas. Esta cuestión y la del valor de los modelos propuestos será respondida por el criterio general: si el modelo tiene o no valor explicativo y predictivo, es decir, si proyecta nueva luz sobre hechos conocidos y prevé atinadamente hechos del pasado o el futuro no conocidos previamente.

Aunque elementales, estas consideraciones están en situación de suprimir muchos malos entendidos y mucha neblina filosófica que han enturbiado el punto.

(1) Tal como se ha subrayado, la evaluación de modelos debe ser sencillamente pragmática, en términos de sus méritos explicativos y predictivos (o de su falta de ellos); no tienen por qué intervenir, pues, consideraciones *a priori* a propósito de su deseabilidad o de sus consecuencias morales.

Aquí topamos con una situación bastante singular. Hay poca objeción contra las llamadas leyes «sincrónicas», supuestas regularidades que gobiernan las sociedades en determinado momento: a decir verdad, al lado del estudio empírico es ésta la meta de la sociología. También hay leyes «diacrónicas», regularidades de desarrollo en el tiempo, que nadie disputa, p. ej. la ley de Grimm que da reglas sobre las mutaciones consonánticas en la evolución de las lenguas indoeuropeas. Es ya lugar común la existencia de «ciclos de vida» —primitivismo, madurez, disolución barroca de la forma y decadencia final, sin causas externas particulares señalables— en campos de la cultura como la escultura griega, la pintura renacentista o la música alemana. Incluso esto tiene su correlato en ciertos fenómenos de evolución biológica; así en las ammonitas y los dinosaurios la fase inicial explosiva de formación de nuevos tipos, seguida de una fase de especiación y finalmente decadencia.

La crítica se hace violenta cuando este modelo es aplicado a la civilización como un todo. Es legítimo preguntarse por qué modelos de las ciencias sociales a menudo tan poco realistas son tema de discusión académica, en tanto que los modelos de la historia

tropiezan con enconada resistencia. Aceptando todas las críticas de hecho alzadas contra Spengler o Toynbee, parece obvio, con todo, que hay de por medio factores emocionales. El camino de la ciencia está sembrado de cadáveres de teorías difuntas; unas se pudren sin más, otras se instalan momificadas en el museo de la historia de la ciencia. En contraste, las construcciones históricas, y en especial las teorías de los ciclos históricos, parecen tocar en carne viva y despiertan oposición muy superior a la crítica usual de una teoría científica.

(2) Esta participación emocional tiene que ver con la cuestión de la «inevitabilidad histórica» y una supuesta degradación de la «libertad» humana. Antes de pasar a ello convendrá discutir los modelos matemáticos y no matemáticos.

Son bien conocidas las ventajas y los inconvenientes de los modelos matemáticos en las ciencias sociales (Arrow, 1956; Rapoport, 1957). Todo modelo matemático es una sobresimplificación, y es discutible si reduce a los huesos los acontecimientos reales o si arranca partes vitales de su anatomía. Por un lado, mientras sirve, permite la deducción necesaria, a menudo con resultados inesperados que no se obtendrían merced al «sentido común» ordinario.

En particular, Rashevsky ha mostrado en varios estudios cómo pueden construirse modelos matemáticos de procesos históricos (Rashevsky, 1951, 1952).

Por otro lado, no debe subestimarse el valor de los modelos puramente cualitativos. P. ej., el concepto de «equilibrio ecológico» fue desarrollado mucho antes de que Volterra y otros implantaran modelos matemáticos; la teoría de la selección es pan de cada día en biología, pero la teoría matemática de la «lucha por la existencia» es comparativamente reciente y anda lejos de haber sido verificada en condiciones de vida libre.

En fenómenos complejos, la «explicación en principio» (Hayek, 1955) mediante modelos cualitativos es preferible a la carencia total de explicación. Esto no se limita en modo alguno a las ciencias sociales y a la historia; se aplica igualmente a campos como la meteorología o la evolución.

(3) La «inevitabilidad histórica» —tema de un célebre estudio de Sir Isaiah Berlin (1955)—, temida como consecuencia de la «historia teórica», y que supuestamente contradice nuestra experiencia directa de disponer de elecciones libres y elimina todos los juicios

y valores morales, es una fantasmagoría basada en una visión del mundo que ya no existe. Como lo subraya Berlin, se funda en el concepto del espíritu laplaciano, en condiciones de predecir cabalmente el porvenir a partir del pasado, por medio de leyes deterministas. Esto no tiene que ver con el moderno concepto de «ley de la naturaleza». Todas las «leyes de la naturaleza» son de carácter estadístico. No predicen un porvenir inexorablemente determinado, sino probabilidades que, dependiendo de la naturaleza de los acontecimientos y de las leyes disponibles, pueden acercarse a la certidumbre o faltarles mucho para alcanzarla. No tiene sentido pedir o temer más «inevitabilidad» en la teoría histórica que en ciencias relativamente refinadas, como la meteorología o la economía.

Paradójicamente, aunque la causa del libre albedrío descansa en el testimonio de la intuición o, más bien, de la experiencia inmediata, y jamás puede probarse objetivamente («¿Fue el libre albedrío de Napoleón el que lo condujo a la campaña de Rusia?»), el determinismo (en sentido estadístico) puede ser probado, al menos en modelos en pequeña escala. Es seguro que los negocios dependen de la «iniciativa» personal, la «decisión» individual y la «responsabilidad» del empresario; la elección, por parte del administrador, entre expansión o no expansión del negocio es «libre» en el mismo sentido precisamente que la elección, por parte de Napoleón, entre aceptar o no batalla en la Moskvá. Sin embargo, cuando se analiza la curva de crecimiento de compañías industriales, se encuentra que desviaciones «arbitrarias» van seguidas de presto retorno a la curva normal, como si actuaran fuerzas invisibles. Haire (1959, p. 283) afirma que «el retorno a la pauta predicha por el curso anterior insinúa la operación de *fuerzas inexorables* que operan en el organismo social» (nosotros subrayamos).

Resulta característico que uno de los puntos de Berlin sea «la falacia del determinismo histórico en virtud de su total inconsistencia con el sentido común y modo cotidiano de ver los asuntos humanos». Este argumento típico es de igual naturaleza que el consejo de no adoptar el sistema copernicano porque todo el mundo puede ver que es el sol y no la tierra el que se mueve de la mañana a la noche.

(4) Recientes adelantos matemáticos incluso permiten someter el «libre albedrío» —el problema filosófico más resistente al análisis científico— a examen matemático.

A la luz de la moderna teoría de los sistemas, la disyuntiva entre enfoques molar y molecular, nomotético e idiográfico, es susceptible de recibir significado preciso. Para el comportamiento de masas se aplicarían leyes de sistemas que, si pudieran ser matematizadas, tendrían la forma de ecuaciones diferenciales del tipo de las usadas por Richardson (cf. Rapoport, 1957) y que ya mencionamos. En contraste, la libre elección por el individuo quedaría descrita por formulaciones de la índole de las teorías de los juegos y la decisión.

Axiomáticamente, las teorías de los juegos y la decisión se ocupan de elecciones «racionales». Quiere esto decir que la elección «maximizará el provecho o la satisfacción para el individuo», que «el individuo es libre de elegir entre varios caminos de acción posibles y decide de acuerdo con sus consecuencias», que, «informado de todas las consecuencias concebibles de sus acciones, escoge la que figura más alto en su lista», que «prefiere más de un bien que menos, en igualdad de las demás circunstancias», etc. (Arrow, 1956). En lugar de ganancia económica puede insertarse cualquier valor superior sin modificar la formulación matemática.

La anterior definición de «elección racional» incluye todo lo que puede significarse por «libre albedrío». Si no queremos igualar el «libre albedrío» a la arbitrariedad completa, la carencia de todo juicio de valor y, así, acciones completamente inconsecuentes (como en el ejemplo favorito del filósofo: depende de mi libre albedrío el que mueva o no mi meñique izquierdo), no es mala definición de las acciones de que se ocupan el moralista, el sacerdote o el historiador: libre decisión entre posibilidades fundada en discernimiento de la situación y sus consecuencias y guiada por valores.

La dificultad de aplicar la teoría inclusive a situaciones reales y sencillas es enorme, no hay ni que decirlo. Sin embargo, sin formulación explícita pueden eválarse en principio ambos enfoques, lo cual lleva a una paradoja inesperada.

El «principio de racionalidad» se ajusta no a la mayoría de las acciones humanas sino antes bien a la conducta «no razonada» de los animales. Los animales y los organismos en general funcionan de modo «raciomorfo», maximizando valores tales como la preservación, la satisfacción, la supervivencia, etc.; escogen en general lo que es biológicamente bueno para ellos y prefieren más cantidad de un bien (comida, p. ej.) que menos.

Por otra parte, el comportamiento humano cae lejos del principio de racionalidad. Ni siquiera hace falta citar a Freud para apuntar cuán reducido es el alcance del comportamiento racional en el hombre. Las mujeres en el supermercado no suelen maximizar su provecho sino que son sensibles a las tretas del publicista y el empacador; no hacen una elección racional revisando todas las posibilidades y consecuencias, y ni siquiera prefieren más cantidad de un producto envuelto discretamente que menos de lo mismo, pero metido en una gran caja roja con un dibujo atractivo. En nuestra sociedad hay una serie de especialistas influyentes —publicistas, investigadores de la motivación, etc.— que se ocupan de hacer irracionales las elecciones, sobre todo acoplando factores biológicos —reflejos condicionados, pulsiones inconscientes— a valores simbólicos (cf. von Bertalanffy, 1956a).

Y de nada sirve pretender que esta irracionalidad de la conducta humana sólo concierne a acciones triviales de la vida cotidiana, pues el mismo principio se aplica a las decisiones «históricas». Oxenstierna, viejo zorro y canciller sueco durante la Guerra de los Treinta años, expresó esto a la perfección: *Nescis, mi fili, quantilla ratione mundus regatur* —no sabes, muchacho, con cuán poca razón es gobernado el mundo—. Al leer los periódicos u oír la radio se nota en seguida que esto es tal vez más aplicable aún al siglo xx que al xvii.

Metodológicamente, hay que sacar una conclusión notable. Si se tiene que aplicar uno de los dos modelos, y si es adoptado el «principio de actualidad», básico en campos históricos como la geología y la evolución (la hipótesis de que no debe recurrirse a más hipótesis o principios explicativos que los observados en operación al presente), es el modelo estadístico o de masas el que está respaldado por la evidencia empírica. Las faenas del investigador de la motivación y la opinión, del psicólogo estadístico, etc., se basan en la premisa de que se dan leyes estadísticas en el comportamiento humano, y que por esa razón una muestra restringida pero bien elegida permite extrapolar a la población total considerada. Los resultados generalmente buenos de las encuestas Gallup verifican la premisa —con uno que otro fracaso, como el bien conocido de la elección de Truman, tal como es de esperarse de las predicciones estadísticas—. La pretensión opuesta —que la historia es regida por el «libre albedrío» en sentido filosófico (decisión racional en pos de lo mejor, el valor moral superior o incluso interés propio

visto con listeza)— no es sustentada por los hechos. Que «individua- listas descomedidos» violen aquí y allá la ley estadística, es cosa que entra en su naturaleza. Ni el papel desempeñado por «grandes hombres» en la historia contradice el concepto de sistemas en la historia; pueden imaginarse como «partes conductoras», «disparado- res» o «catalizadores» en el proceso histórico, fenómeno del que da bien razón la teoría general de los sistemas.

(5) Otra cuestión es la de la «analogía organísmica», unánime- mente condenada por los historiadores. Combaten sin cuartel contra la naturaleza «metafísica», «poética», «mítica» y enteramente anti- científica del aserto de Spengler de que las civilizaciones son una especie de «organismos», que nacen, se desarrollan siguiendo sus leyes internas y acaban por morir. Toynbee (1961, p. ej.) se afana mucho en subrayar que no cayó en la trampa spengleriana, aun cuando sea bastante difícil ver sus civilizaciones —conectadas por relaciones biológicas de «afiliación» y «emparentamiento», aun con estricto lapso de desarrollo— como no concebidas organísmi- camente.

Nadie sabe mejor que el biólogo que las civilizaciones no son «organismos». Es trivial ver que un organismo biológico, una entidad y unidad material en el espacio y en el tiempo, difiere de un grupo social consistente en individuos distintos, y todavía más de una civilización, consistente en generaciones de seres humanos, de productos materiales, instituciones, ideas, valores y cuántas cosas más. Es mucho subestimar la inteligencia de Vico, de Spengler (o de cualquier individuo normal) suponer que no se dieron cuenta de algo tan obvio.

Con todo, es interesante notar que, en contraste con los escrúpu- los del historiador, los sociólogos no aborrecen la «analogía organis- mica» sino que la dan por sabida. Dicen, p. ej., Rapoport y Horvath (1959):

Tiene algún sentido considerar una organización real como un organismo, esto es, hay razón para creer que esta comparación no es una estéril analogía metafórica, como era común en la especulación escolástica acerca del cuerpo político. En las organi- zaciones son demostrables funciones cuasibiológicas. Se mantie- nen; a veces se reproducen o metastatizan; responden a tensio- nes; envejecen, y mueren. Las organizaciones tienen anatomías

discernibles, y cuando menos las que transforman insumos materiales (como las industrias) tienen fisiologías.

Y Sir Geoffrey Vickers (1957):

Las instituciones crecen, se reparan, se reproducen, decaen, se disuelven. En sus relaciones externas exhiben muchas características de la vida orgánica. Hay quienes piensan que en sus relaciones internas también las instituciones humanas están destinadas a tornarse crecientemente orgánicas, que la cooperación humana se acercará cada vez más a la integración de las células en un cuerpo. Hallo este panorama no convincente y desagradable.

Lo mismo le parece, al presente autor. Pero oigamos a Haire (1959, p. 272):

El modelo biológico de las organizaciones sociales —y aquí, en particular, las organizaciones industriales— implica tomar como modelo el organismo viviente y los procesos y principios que regulan su crecimiento y desarrollo. Significa buscar procesos sometidos a leyes en el crecimiento organizacional.

El hecho de que leyes simples de crecimiento sean aplicables a entidades sociales tales como las compañías manufactureras, a la urbanización, la división del trabajo, etc., prueba que a estos respectos la «analogía organicista» es correcta. Pese a las protestas de los historiadores, la aplicación de modelos teóricos, en particular el modelo de los sistemas dinámicos, abiertos y adaptativos (McClelland, 1958), al proceso histórico, tiene ciertamente sentido. Esto no implica «biologismo», reducción de conceptos sociales a biológicos, sino que refleja la intervención de principios de sistemas en ambos campos.

(6) Dando por acogidas todas las objeciones —mal método, errores de hecho, enorme complejidad del proceso histórico—, tenemos sin embargo que admitir, gustenos o no, que los modelos cíclicos de la historia pasan la más importante prueba de las teorías científicas. Las predicciones de Spengler en *La decadencia de Occidente*, las de Toynbee al prever tiempos revueltos y Estados contendientes, las de Ortega y Gasset en *La rebelión de las masas* —podríamos agregar de una vez *Un mundo feliz y 1984*—, se han cumplido en grado inquietante, considerablemente mejor que muchos respetables modelos de los científicos sociales.

¿Implica esto «inevitabilidad histórica» e inexorable disolución? Una vez más, no atinaron con la sencilla respuesta los historiadores moralizantes y filosofantes. Por extrapolación a partir de los ciclos vitales de civilizaciones previas, nadie habría predicho la Revolución industrial, la explosión demográfica, el descubrimiento de la energía atómica, el surgimiento de naciones subdesarrolladas y la expansión de la civilización occidental por todo el globo. ¿Refuta esto el pretendido modelo y «ley» de la historia? No; tan sólo afirma que ese modelo —como todos en la ciencia— refleja sólo algunos aspectos o facetas de la realidad. Ningún modelo se hace peligroso mientras no cae en la falacia del «nada sino» que perjudica no solamente a la historia teórica sino a los modelos de la imagen mecanicista del mundo, a los del psicoanálisis y a otros muchos más.

En este repaso aspiramos a haber mostrado que la teoría general de los sistemas ha contribuido a la expansión de la teoría científica, que ha conducido a nuevas visiones y principios y ha abierto nuevos problemas «investigables», es decir que se prestan a mayor estudio, experimental o matemático. Son obvias las limitaciones de la teoría y de sus aplicaciones en el estado actual, pero los principios parecen ser en lo esencial acertados, según se aprecia por su aplicación a diferentes campos.

V. El organismo considerado como sistema físico

El organismo como sistema abierto

La fisicoquímica expone la teoría de la cinética y los equilibrios en los sistemas químicos. Considérese como ejemplo la reacción reversible de formación de un éster:



donde siempre se establecerá determinada razón cuantitativa entre alcohol y ácido acético por un lado, entre éster y agua por el otro.

La aplicación de principios de equilibrio fisicoquímico, especialmente de cinética química y la ley de acción de masas, ha demostrado tener fundamental importancia para explicar procesos fisiológicos. Un ejemplo es la función de la sangre, el transporte de oxígeno del pulmón a los tejidos del cuerpo y de dióxido de carbono formado en los tejidos hasta el pulmón, para ser exhalado; el proceso resulta de los equilibrios entre hemoglobina, oxihemoglobina y oxígeno, de acuerdo con la ley de acción de masas, y pueden formularse cuantitativamente no sólo las sencillas condiciones de la disolución de hemoglobina, sino las más complejas de la sangre de los vertebrados. Es bien conocida la importancia de la consideración cinética de las reacciones enzimáticas, la respiración, la fermentación, etc. Tienen importancia fisiológica fundamental otros equilibrios fisicoquímicos (de distribución, de difusión, de adsorción, electrostáticos) (cf. Moser y Moser-Egg, 1934).

Considerado el organismo como un todo, muestra características similares a las de los sistemas en equilibrio (cf. Zwaardemaker, 1906, 1927). Hallamos, en la célula y en el organismo multicelular, determinada composición, una razón constante entre los componentes, que a primera vista recuerda la distribución de componentes en un sistema químico en equilibrio y que, en gran medida, persiste en diferentes condiciones, luego de perturbación, con distintos tamaños corporales, etc.; hay independencia de la composición con respecto a la cantidad absoluta de los componentes, capacidad reguladora después de perturbaciones, constancia de composición en condiciones cambiantes y con nutrición cambiante, etc. (cf. von Bertalanffy, 1932, pp. 190ss; 1937, pp. 80ss).

Advertimos de inmediato que se dan sistemas en equilibrio en el organismo, pero que el organismo como tal no puede considerarse como un sistema en equilibrio.

El organismo no es un sistema cerrado sino abierto. Llamamos «cerrado» a un sistema si no entra en él ni sale de él materia; es «abierto» cuando hay importación y exportación de materia.

Hay, pues, un contraste fundamental entre los equilibrios químicos y los organismos metabolizantes. El organismo no es un sistema estático cerrado al exterior y que siempre contenga componentes idénticos: es un sistema abierto en estado (cuasi) uniforme, mantenido constante en sus relaciones de masas en un intercambio continuo de material componente y energías: entra continuamente material del medio circundante, y sale hacia él.

El carácter del organismo como sistema en estado uniforme (o, mejor, cuasiuniforme) es uno de sus criterios primarios. De manera general, los fenómenos fundamentales de la vida pueden considerarse consecuencias de este hecho. Al considerar el organismo por un lapso más breve, aparece como una configuración mantenida en estado uniforme por intercambio de componentes. Esto corresponde al primer campo principal de la fisiología general: la fisiología del metabolismo en sus aspectos químicos y energéticos. Superpuestas al estado uniforme hay ondas de procesos, menores y básicamente de dos clases. Están primero los procesos periódicos que se originan en el sistema mismo y son así autónomos (p. ej., movimientos automáticos de los órganos de la respiración, la circulación y la digestión; actividades eléctricas automático-rítmicas de los centros nerviosos y el cerebro, supuestamente resultantes de descargas químicas rítmicas; movimientos automáticos del organismo en conjunto).

En segundo lugar, el organismo reacciona a cambios temporales del medio circundante, a «estímulos», con fluctuaciones reversibles de su estado uniforme. Éste es el grupo de procesos causados por cambios de las condiciones externas y heteronómicamente subsumidos en la fisiología de la excitación. Pueden considerarse perturbaciones temporales del estado uniforme, a partir de las cuales el organismo retorna al «equilibrio», al fluir igual del estado uniforme. Tal consideración ha demostrado ser útil y conducir a formulaciones cuantitativas (cf. p. 141 *s*). Finalmente, la definición del estado del organismo como uniforme sólo es válida en primera aproximación, en la medida en que consideremos lapsos cortos en un organismo «adulto», como, p. ej., al investigar el metabolismo. Si tomamos el ciclo vital total, el proceso no es estacionario sino sólo cuasiestacionario, sujeto a cambios bastante lentos como para prescindir de ellos con determinados fines de indagación, y que comprende el desarrollo embrionario, el crecimiento, el envejecimiento, la muerte, etc. Estos fenómenos, no abarcados como es debido bajo el término de morfogénesis, representan el tercer gran complejo de problemas de la fisiología general. Tal consideración demuestra ser especialmente provechosa en áreas accesibles a la formulación cuantitativa.

En general, la fisicoquímica está limitada casi exclusivamente a la consideración de proceso en sistemas cerrados. A ellos se refieren las formulaciones bien conocidas; la ley de acción de masas, en particular, se usa sólo para la definición de verdaderos equilibrios químicos en sistemas cerrados. La aplicabilidad de equilibrios químicos, p. ej., a reacciones de transferencia se basa en el hecho de que se trata de reacciones iónicas rápidas que alcanzan el equilibrio. Los sistemas químicos abiertos apenas los considera la fisicoquímica. Es comprensible esta restricción de la cinética a los sistemas cerrados: es más difícil técnicamente establecer sistemas abiertos, y carecen de importancia esencial en la consideración puramente física. Con todo, tales disposiciones son fáciles de visualizar, p. ej. cuando en una reacción $a \rightleftharpoons b$ el producto b de la reacción de izquierda a derecha es eliminado continuamente del sistema por algún medio adecuado (precipitación, diálisis a través de una membrana permeable sólo para b mas no para a , etc.), en tanto que se introduce continuamente a en el sistema. Sistemas de este género aparecen ocasionalmente en química tecnológica; la fermentación continua,

en la producción de ácido acético, es un ejemplo de lo que aquí llamamos «sistema químico abierto».

Sin embargo, tales sistemas tienen gran importancia para el biólogo. Pues sistemas químicos abiertos están de hecho realizados en la naturaleza en forma de organismos vivos, que se mantienen en continuo intercambio de sus componentes. «La vida es un equilibrio dinámico en un sistema polifásico» (Hopkins).

Necesitamos, entonces, una definición del llamado equilibrio estacionario —constancia de composición en el cambio de componentes—, así como las bien conocidas expresiones de la fisicoquímica definen auténticos equilibrios químicos en sistemas cerrados.

Es evidente que el sistema de reacción y las condiciones de reacción son infinitamente más complicados en los organismos que en los sistemas de que suele ocuparse la fisicoquímica. Hay reacciones entre un número extraordinario de componentes. Más aun, la célula y el organismo no son sistemas homogéneos (genuinas disoluciones), sino que representan sistemas coloidales altamente heterogéneos, de suerte que las reacciones no dependen sólo de la acción de masas sino de numerosos factores fisicoquímicos de adsorción, difusión, etc. Ni siquiera las reacciones enzimáticas en tubo de ensayo siguen sencillamente, por regla general, la ley de acción de masas. Siendo tal el caso, es claro que ni siquiera las reacciones de sistemas organismos sencillos podrán escribirse como un sistema cerrado de ecuaciones; esto sólo se logra para sistemas parciales aislados. Es posible, sin embargo, *primero*, enunciar algunos principios generales para sistemas abiertos, sin importar la naturaleza especial del sistema. En *segundo* lugar, aunque en vista del número enorme de reacciones que se dan en el organismo, y aun en una célula, sea imposible seguir reacciones determinadas, pueden emplearse expresiones que representen promedios estadísticos de una multitud de procesos incalculables y hasta desconocidos. Este proceder es ya aplicado en química al escribir fórmulas generales para reacciones que en realidad proceden en numerosas etapas. Análogamente, los balances en la fisiología del metabolismo y la bioenergética se basan en promedios estadísticos resultantes de numerosos procesos (en gran medida desconocidos) del metabolismo intermedio. Podemos, p. ej., resumir los procesos anabólicos y catabólicos como «asimilación» y «disimilación», respectivamente, y considerar, en primera aproximación, el estado uniforme como balance de «asimilación» y «disimilación». Tales magnitudes, que repre-

sentan promedios estadísticos de una multitud de procesos inextricables, sirven para el cálculo de modo parecido a como se hace en fisicoquímica en el caso de compuestos y reacciones definidos.

El mantenimiento del sistema en continuo fluir e intercambio de materia y energía, el orden de innumerables reacciones fisicoquímicas en una célula u organismo, que garantizan aquél, la conservación de razones constantes entre los componentes incluso en condiciones diferentes, después de perturbaciones, dadas diferentes dimensiones, etc., constituyen los problemas centrales del metabolismo orgánico. Este cambio bifronte de los sistemas vivientes en la asimilación y la disimilación manifiesta —en palabras de von Tschermak (1916)— una tendencia hacia el mantenimiento de determinado estado, con la regeneración compensando el trastorno causado por la degeneración. ¿Cómo es que lo perdido en el proceso se reconstituye a partir de los materiales suministrados por la nutrición, que lo bloques de construcción liberados por enzimas hallen su lugar adecuado en el sistema orgánico, de suerte que sostenga su metabolismo? ¿Cuál es el principio de la «autorregulación automática» del metabolismo? Tenemos amplio conocimiento de procesos fisicoquímicos que se dan en la célula y en el organismo, pero no debemos perder de vista el hecho de que «aun después de completa explicación de cada uno de los procesos, seguimos a mil leguas de entender el metabolismo total de una célula» (M. Hartmann, 1927, p. 258). Poquisimo se sabe acerca de los principios que controlan los distintos procesos del modo antes indicado. Nada de raro tiene que este problema conduzca una y otra vez a conclusiones vitalistas (p. ej. Kottje, 1927).

Es claro que principios generales como los que vamos a desarrollar no llegan a suministrar una explicación detallada de estos problemas; podrán, cuando menos, indicar el fundamento físico general de una característica esencial de la vida, la autorregulación del metabolismo y la conservación de componentes a través del cambio. El modo especial como esto se realiza en los procesos metabólicos sólo lo puede determinar la investigación experimental. Es de esperarse, no obstante, que la consideración general despierte la atención hacia posibilidades hasta la fecha apenas tenidas en cuenta, y que las formulaciones propuestas, o ecuaciones parecidas, permitan describir fenómenos concretos.

Características generales de los sistemas químicos abiertos

Los auténticos equilibrios en sistemas cerrados y los «equilibrios estacionarios» en sistemas abiertos exhiben cierta semejanza, ya que el sistema, tomado en conjunto y considerado en sus componentes, se mantiene constante en ambos sistemas. Pero la situación física en los dos casos es fundamentalmente distinta. Los equilibrios químicos en sistemas cerrados se basan en reacciones reversibles; son consecuencia del segundo principio de la termodinámica y los define un mínimo de energía libre. Por el contrario, en los sistemas abiertos el estado uniforme no es reversible ni en conjunto ni en muchas reacciones. Por lo demás, el segundo principio sólo se aplica, por definición, a sistemas cerrados, y no define el estado uniforme.

De acuerdo con el segundo principio, un sistema cerrado *debe* a fin de cuentas alcanzar un estado de equilibrio independiente del tiempo, definido por máxima entropía y mínima energía libre (equilibrio térmico, derivación termodinámica de la ley de acción de masas por Van't Hoff, etc.), con razón constante entre las fases. Un sistema químico abierto *puede* alcanzar (suponiendo ciertas condiciones) un estado uniforme independiente del tiempo, en el cual el sistema persista constante en conjunto y en sus fases (macroscópicas), aunque haya un fluir continuo de materias componentes.

Un sistema cerrado en equilibrio no requiere energía para su preservación, ni puede obtenerse energía de él. P. ej., un depósito cerrado contiene una gran cantidad de energía (potencial), pero no sirve para impulsar un motor. Lo mismo pasa con un sistema químico en equilibrio. No está en estado de reposo químico; las reacciones proceden de continuo, reguladas por la ley de acción de masas de manera que se forme, de cada clase de moléculas o iones, tanto como lo que desaparece. Con todo, el equilibrio químico es incapaz de realizar trabajo. Para mantener los procesos en marcha no se requiere trabajo, ni puede obtenerse trabajo de ellos. La suma algebraica del trabajo obtenido de las reacciones elementales y empleado por ellas es igual a cero. A fin de realizar trabajo es necesario que el sistema no esté en un estado de equilibrio sino que tienda a alcanzarlo; sólo entonces puede obtenerse energía. A fin de conseguir esto continuamente, hay que disponer estacionariamente los sistemas, sean hidrodinámicos o químicos: hay que mantener un fluir uniforme de agua o sustancias químicas cuyo contenido energético se transforme en trabajo. Así, la capacidad

continua de trabajar no es posible en un sistema cerrado, que tiende a alcanzar cuanto antes el equilibrio, sino sólo en un sistema abierto. El aparente «equilibrio» hallado en un organismo no es un verdadero equilibrio incapaz de producir trabajo; es un pseudo-equilibrio dinámico, mantenido constante a cierta distancia del equilibrio genuino, y con ello capaz de producir trabajo, si bien requiriendo, eso sí, suministro continuo de energía para guardar la distancia con respecto al equilibrio verdadero.

Para mantener el «equilibrio dinámico» es necesario que las velocidades de los procesos estén exactamente armonizadas. Sólo así es posible que algunos componentes sean demolidos, liberando así energía utilizable, en tanto que, por otro lado, la importación impide al sistema alcanzar el equilibrio. Las reacciones rápidas, también en el organismo, conducen al equilibrio químico (entre hemoglobina y oxígeno, p. ej.); las reacciones lentas no alcanzan el equilibrio sino que persisten en estado uniforme. Así, la condición para la existencia de un sistema químico en estado uniforme es cierta lentitud en las reacciones. Reacciones instantáneas, como las que se dan entre iones, llevan al equilibrio en un tiempo «infinitamente corto». El mantenimiento de un estado uniforme en el organismo se debe al hecho de estar constituido por complejos de carbono; por un lado, son ricos en energía, pero químicamente inertes, de modo que es posible el mantenimiento de abundante potencial químico; por otra parte, la liberación rápida y regulada de esta cantidad de energía se debe a acción enzimática, con lo cual se mantiene un estado uniforme.

Para derivar condiciones y características de estados uniformes podemos emplear una ecuación general de transporte. Sea Q_i una magnitud del elemento i -ésimo del sistema, p. ej. una concentración o energía en un sistema de ecuaciones simultáneas. Su variación puede ser expresada por:

$$\frac{\delta Q_i}{\delta t} = T_i + P_i \quad (5.1)$$

T_i representa la velocidad de transporte del elemento Q_i en un elemento de volumen en determinado punto del espacio, en tanto que P_i es la velocidad de producción.

Muchas ecuaciones que aparecen en física, biología y hasta sociología pueden ser consideradas casos especiales de (5.1).

Por ej., a escala molecular las P_i son las funciones que indican la velocidad de reacciones por las cuales las sustancias Q_i se forman y destruyen; T_i tendrá diferentes formas, según el sistema considerado. Si, p. ej., no hay fuerzas exteriores que influyan sobre las masas, las T_i serán expresadas por la ecuación de difusión de Fick. En caso de que las T_i desaparezcan, tendremos las ecuaciones acostumbradas para un conjunto de reacciones en un sistema cerrado; si P_i se esfuman, tenemos la ecuación simple de difusión, donde T_i tiene la forma $T_i = D_i \nabla^2 Q_i$ y el símbolo laplaciano ∇^2 representa la suma de derivadas parciales para x, y, z ; D_i son coeficientes de difusión. En biología aparecen ecuaciones de este tipo, p. ej., en el crecimiento, y tampoco faltan en sociología y dinámica de poblaciones. En general, el ritmo de cambio de una población es igual al movimiento de población (inmigración menos emigración) más la tasa de reproducción (tasa de natalidad menos tasa de mortalidad).

En general, pues, tenemos un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales simultáneas. P_i , así como T_i , solerán ser funciones no lineales de Q_i y otras variables del sistema, aparte de ser funciones de las coordenadas espaciales x, y, z y del tiempo t . Para resolver la ecuación debemos conocer la forma especial de las ecuaciones y las condiciones iniciales y limitantes.

Para nuestros fines son importantes dos consideraciones, que podemos llamar secciones temporales transversales y longitudinales. El primer problema es el mantenimiento en un estado uniforme, lo cual, biológicamente, es el punto fundamental del metabolismo. El segundo concierne a cambios del sistema con respecto al tiempo, biológicamente expresados, p. ej. crecimiento. Mencionaremos de pasada otro problema: los cambios periódicos, como los que, en el dominio organismico, son característicos de procesos autónomos, tales como los movimientos automático-rítmicos, etc. Estos tres aspectos corresponden a los problemas generales de los tres campos básicos de la fisiología (cf. pp. 5).

El problema de la «sección temporal longitudinal», de los cambios del sistema en el tiempo, será resuelto merced a la solución de ecuaciones diferenciales de tipo (5.1).

Como ejemplo sencillo considérese un sistema químico abierto, consistente en sólo un componente Q , con entrada continua de materia y eliminación de los productos de reacción resultantes. Sea E la cantidad de material reaccionante importada por unidad

de tiempo, y k la constante de reacción de acuerdo con la ley de acción de masas; por lo tanto, kQ es el grado de cambio por unidad de tiempo; suponiendo que la cantidad importada al principio sea mayor que la transformada, la concentración en el sistema aumentará de acuerdo con la ecuación:

$$\frac{dQ}{dt} = E - kQ. \quad (5.2)$$

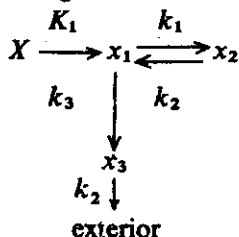
Según se ve fácilmente, éste es un caso especial de la ecuación general (5.1). Como se supuso importación constante y salida correspondiente a la reacción química, se descuidaron los gradientes de difusión y concentración (se supuso, por así decirlo, perfecta «agitación» del sistema), y las coordenadas espaciales de (5.1) desaparecieron; en lugar de una ecuación diferencial parcial, tenemos una ordinaria. Entonces la concentración en el tiempo t es:

$$Q = \frac{E}{k} - \left(\frac{E}{k} - Q_0 \right) e^{-kt}, \quad (5.3)$$

donde Q_0 es la concentración inicial cuando $t=0$. O sea que la concentración aumenta asintóticamente hasta cierto límite, en el cual el ciclo de renovación es igual al insumo (supuesto constante).

Esta concentración máxima es $Q_{\infty} = E/k$.

Un sistema más próximo a las condiciones biológicas es el siguiente. Sea el transporte de materia a_1 hacia adentro del sistema proporcional a la diferencia entre su concentración fuera y dentro del sistema ($X - x_1$). Biológicamente, pensemos en azúcares simples o en aminoácidos. El material importado a_1 forma, por una reacción monomolecular y reversible, un compuesto a_2 de concentración x_2 (p. ej. monosacáridos transformados en polisacáridos, aminoácidos en proteínas). Por otra parte, la sustancia a_1 es catabolizable según una reacción irreversible (p. ej. oxidación, desaminación) que da a_3 , y a_3 se separa del sistema, en grado proporcional a su concentración. Tenemos entonces el siguiente sistema de reacciones:



$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (5.8)$$

Consideremos ahora la sección transversal temporal, o sea la distribución de componentes en el estado uniforme, independiente del tiempo.

En general, un sistema definido por la ecuación (5.1) tiene tres soluciones diferentes. Primero, puede haber aumento ilimitado de las Q_i ; segundo, puede alcanzarse un estado uniforme independiente del tiempo; tercero, pueden darse soluciones periódicas.

Es difícil probar la existencia de un estado uniforme para el sistema general (5.1), pero puede mostrarse en ciertos casos. Supóngase que ambos términos son lineales en las Q_i e independientes de t . Entonces la solución se obtiene por medios ordinarios de integración y es de la forma:

$$Q_i = Q_{i1}(x, y, z) + Q_{i2}(x, y, z, t), \quad (5.9)$$

donde Q_{i2} es una función de t que, al crecer el tiempo, decrece hasta cero, para ciertas relaciones entre constantes y condiciones limitantes.

Por otra parte, si hay un estado uniforme independiente del tiempo expresado por Q_{i1} en (5.9), Q_{i1} debe bastar para la ecuación independiente del tiempo:

$$T_i + P_i = 0 \quad (5.10)$$

Partiendo de esto vemos que:

1) Si hay una solución estacionaria, la composición del sistema en estado uniforme permanece constante con respecto a los componentes Q_i , aunque las reacciones continúen y no lleguen a equilibrio, como en un sistema cerrado, y aunque haya entrada y salida de materia; la situación es, muy característica de los sistemas orgánicos.

2) En el caso uniforme, el número de elementos que entran en el estado $Q_i(x, y, z, t)$ por transporte y reacción química por unidad de tiempo es igual al número que sale de él.

Pueden hacerse consideraciones parecidas con respecto a las soluciones periódicas. Es verdad que la anterior derivación presupone cosas bastante especiales a propósito de las ecuaciones. No obstante, aunque no se conoce criterio general para la existencia de soluciones estacionarias y periódicas en el sistema (5.1), pueden indicarse condiciones para algunos tipos de casos lineales y hasta no lineales. Es importante para nosotros el hecho de que la existencia de «equilibrios» dinámicos estacionarios en sistemas abiertos o, como también podríamos decir, la existencia de cierto orden de procesos garantizados por principios dinámicos, y no estructural-mecánicos, sea derivable a partir de consideraciones generales.

Resolviendo las ecuaciones (5.4) para el estado uniforme obtenemos:

$$x_1 : x_2 : x_3 = 1 : \frac{k_1}{k_2} : \frac{k_3}{K_2}$$

Vemos, pues, que en el estado uniforme se establece una razón constante entre los componentes, aunque no se base en un equilibrio de reacciones reversibles, como en un sistema cerrado, sino que las reacciones sean en parte irreversibles. Más aun, la razón entre componentes en el estado uniforme depende sólo de las constantes reaccionales, no de la cantidad de importación; así, el sistema muestra «autorregulación» comparable al caso de los sistemas orgánicos, donde la razón entre componentes es mantenida modificando la entrada de materia, cambiando las dimensiones absolutas, etc.

Encontramos asimismo que:

$$x_1^* = \frac{K_1 X}{K_1 + k_3}$$

En caso de que una perturbación externa («estímulo») conduzca a catabolismo incrementado —es decir, a incremento de la constante cinética k_3 mientras las demás persisten inalteradas—, x_1 disminuye. Pero como el transporte hacia adentro es proporcional a la diferencia de concentraciones $X - x_1$, al aumentar ésta aumenta también la entrada. Si después del «estímulo» retorna la constante de catabolismo a su valor normal, el sistema regresará al estado original. Pero si persiste la perturbación y con ello el cambio de ritmo catabólico, se establecerá un nuevo estado uniforme. De manera que el sistema genera fuerzas dirigidas contra la perturbación, ten-

dientes a compensar el catabolismo incrementado por medio de incremento en la incorporación. Exhibe, entonces, «adaptación» a la nueva situación. Siguen, pues, las características «autorreguladoras» del sistema.

Se ve, pues, que las propiedades señaladas como características de los sistemas orgánicos son consecuencias de la naturaleza de los sistemas abiertos: mantenimiento en «equilibrio dinámico», independencia de la composición con respecto a la cantidad absoluta de componentes, conservación de la composición bajo condiciones y nutrición cambiantes, restablecimiento de equilibrio dinámico luego de catabolismo normal o de catabolismo inducido por un estímulo, orden dinámico de procesos, etc. La «autorregulación del metabolismo» se torna comprensible sobre la base de principios físicos.

Equifinalidad

Una importante característica de los sistemas biológicos se encierra en términos como «intencionalidad», «finalidad», «persecución de metas», etc. Veamos si consideraciones físicas pueden contribuir a aclarar estos términos.

Se ha subrayado a menudo que todo sistema que alcanza un equilibrio muestra, en cierto modo, comportamiento «finalista», según discutimos atrás (pp. 77 ss).

Más importante es la siguiente consideración. Se han hecho frecuentes intentos de comprender las regulaciones orgánicas como establecimiento de un «equilibrio» (de naturaleza complicadísima, ni que decir tiene) (p. ej. Köhler, 1927), de aplicar principios como el de Le Chatelier. No estamos en condiciones de definir semejante «estado de equilibrio» en procesos orgánicos complicados, pero es fácil ver que tal concepción es inadecuada en principio. Pues, aparte de algunos procesos particulares, los sistemas vivos no son sistemas cerrados en verdadero equilibrio, sino sistemas abiertos en estado uniforme.

Ahora bien, los estados uniformes en sistemas abiertos tienen notables características.

Un aspecto muy típico del orden dinámico en los procesos orgánicos puede denominarse *equifinalidad*. Los procesos que acontecen en estructuras como de máquina siguen un camino fijo. Así, el estado final cambiará si se alteran las condiciones iniciales o el curso de los procesos. En contraste, puede alcanzarse el mismo

estado final, la misma «meta», partiendo de diferentes condiciones iniciales y siguiendo distintos itinerarios en los procesos organismicos. Son ejemplos el desenvolvimiento de un organismo normal a partir de un cigoto entero, dividido o formado por fusión de dos, o partiendo de pedazos, como en los hidroides y las planarias; o la llegada a un tamaño final definido a partir de distintos tamaños iniciales y después de itinerarios de crecimiento diferentes, etc.

Podemos definir:

Un sistema de elementos $Q_i(x, y, z, t)$ es equifinal en cualquier subsistema de elementos Q_j si las condiciones iniciales $Q_{i0}(x, y, z)$ pueden cambiarse sin cambiar el valor de $Q_j(x, y, z, \infty)$.

Estipulemos dos interesantes teoremas:

(1) Si existe una solución de la forma (5.9), las condiciones iniciales no intervienen en la solución para el estado uniforme. Esto significa que *si los sistemas abiertos* (del tipo discutido) alcanzan un estado uniforme, éste tiene un valor equifinal o independiente de las condiciones iniciales. Es difícil una prueba general, vista la carencia de criterios generales para la existencia de estos uniformes, pero la prueba es posible en casos especiales.

(2) En un sistema cerrado, alguna función de los elementos —p. ej., la masa o la energía totales— es por definición una constante. Considérese una integral del sistema $M(Q_i)$. Si las condiciones iniciales de Q_i son dadas por Q_{i0} , debemos tener:

$$M(Q_i) = M(Q_{i0}) = M, \quad (5.11)$$

independiente de t . Si las Q_i tienden hacia un valor asintótico Q_{i1} ,

$$M(Q_{i1}) = M \quad (5.12)$$

M no puede ser enteramente independiente de Q_{i0} al cambiar Q_{i0} se alteran también M y por tanto $M(Q_{i1})$. Si esta integral cambia de valor, tendrán que cambiar al menos algunas Q_{i1} . Ahora bien, esto es contrario a la definición de equifinalidad. Enunciemos entonces el teorema: *un sistema cerrado no puede ser equifinal con respecto a todas las Q_i .*

Por ejemplo, en el caso más sencillo de un sistema químico abierto de acuerdo con la ecuación (5.2), la concentración en el tiempo t es dada por (5.3); para $t = \infty$, $Q = E/k$, o sea que es independiente de la concentración Q_0 y dependiente sólo de las

constantes del sistema, E y k . Rashevsky (1938, capítulo 1) es autor de una derivación de la equifinalidad —de la llegada a un estado uniforme independiente del tiempo y las condiciones iniciales— en sistemas de difusión.

Por supuesto, la consideración especial no ofrece explicación para fenómenos específicos, a menos que conozcamos las condiciones especiales. Con todo, la formulación general no carece de interés. Vemos, primero, que es posible dar una formulación física al concepto en apariencia metafísico o vitalista de finalidad; como es bien sabido, el fenómeno de la equifinalidad es fundamento de las pretendidas «pruebas» del vitalismo de Driesch. En segundo lugar, apreciamos la estrecha relación entre una característica fundamental del organismo —el hecho de que no sea un sistema cerrado en equilibrio termodinámico sino un sistema abierto en estado (cuasi) estacionario— y otra, que es la equifinalidad*.

Un problema no considerado aquí es el de la dependencia de un sistema no sólo con respecto a condiciones actuales sino a condiciones pasadas y al curso seguido en el pasado. Se trata de los fenómenos llamados «hereditarios» (en sentido matemático: E. Picard) o «históricos» (Volterra) (cf. D'Ancona, 1939, capítulo xxii). A esta categoría pertenecen fenómenos de histéresis en elasticidad, electricidad, magnetismo, etc. Tomando en consideración la dependencia con respecto al pasado, nuestras ecuaciones se convertirían en integro-diferenciales, como las discutidas por Volterra (cf. D'Ancona) y Donnan (1937).

Aplicaciones biológicas

Será evidente a estas alturas que muchas características de los sistemas orgánicos, consideradas a menudo vitalistas o místicas, son derivables del concepto de sistema y de las características de

* Las limitaciones de la regulación orgánica se basan en el hecho de que el organismo (ontogenética tanto como filogenéticamente) pasa del estado de un sistema de elementos dinámicamente interactuantes al estado de «mecanismos» estructurales y cadenas causales diversas (cf. pp. 70ss). Si los componentes se hacen independientes unos de otros, el cambio en cada uno depende sólo de las condiciones en tal componente. El cambio o la supresión de un componente debe causar un estado final diferente del normal; la regulación es imposible en un sistema completamente «mecanizado», que se desintegra en cadenas causales mutuamente independientes (salvo por el control por mecanismos de retroalimentación, cf. pp. 43ss, y otras partes).

unas cuantas ecuaciones de sistemas muy generales, asociadas a consideraciones termodinámicas o mecánico-estadísticas.

Si el organismo es un sistema abierto, los principios generalmente aplicables a este género *deben* serle aplicables (mantenimiento en cambio, orden dinámico de procesos, equifinalidad, etc.), sin importar nada la naturaleza de las relaciones y procesos, tan complicados, por supuesto, que se dan entre los componentes.

Por supuesto, semejante consideración general no explica fenómenos vitales determinados. Los principios discutidos, sin embargo, proporcionarán un marco o esquema general, que dará cabida a teorías cuantitativas de fenómenos vitales específicos. En otros términos, deben resultar teorías de fenómenos biológicos determinados como casos especiales de nuestras ecuaciones generales. Sin aspirar a ser completos, unos cuantos ejemplos mostrarán de qué modo la concepción del organismo como sistema químico abierto y en estado uniforme ha demostrado ser una eficaz hipótesis de trabajo en varios campos.

Rashevsky (1938) investigó, como modelo teórico simplificadísimo de una célula, el comportamiento de una gotita metabolizante, a la cual se difundieran sustancias desde fuera, dentro de la cual sufrieran reacciones químicas y de la cual escaparan productos de reacción. Esta consideración de un caso sencillo de sistema abierto (cuyas ecuaciones son casos especiales de nuestra ecuación 5.1) permite la deducción matemática de una serie de características siempre consideradas fenómenos vitales esenciales. Para semejantes sistemas resulta un orden de magnitud correspondiente al de las células reales, su crecimiento y su división periódica, la imposibilidad de generación espontánea (*omnis cellula a cellula*), características generales de la división celular, etc.

Oterhout (1932-33) aplicó, y elaboró cuantitativamente, la consideración según sistemas abiertos de fenómenos de permeabilidad. Estudió la permeación en modelos celulares consistentes en una capa no acuosa entre un medio acuoso externo y otro interno (correspondiente este último al jugo celular). Hay una acumulación de sustancias penetrantes dentro de esta célula, lo cual se explica por salificación de la sustancia penetrante. El resultado no es un equilibrio sino un estado uniforme, en el cual la composición del jugo celular permanece constante mientras incrementa el volumen. Este modelo se parece al mencionado en la p. 131. Fueron derivadas

expresiones matemáticas, y la cinética de este modelo es análoga a la que se da en las células vivas.

Los sistemas abiertos y los estados uniformes en general desempeñan un papel fundamental en el metabolismo, si bien sólo ha sido posible la formulación matemática en casos o modelos sencillos. Por ej., la continuación de la digestión sólo es posible en virtud de la continua resorción de los productos de la acción enzimática por el intestino; así, jamás se alcanza un estado de equilibrio. En otros casos la acumulación de productos de reacción puede hacer que se detenga la reacción, lo cual explica algunos procesos de regulación (cf. von Bertalanffy, 1932, p. 191). Esto es válido a propósito del uso de materiales de depósito: la descomposición del almidón depositado en el endospermo de muchas semillas vegetales, dando productos solubles, es regulada por la necesidad de carbohidratos que tiene la planta en crecimiento; si el desarrollo es inhibido experimentalmente, se detiene el aprovechamiento de almidón del endospermo. Pfeffer y Hansteen (citados por Höber, 1926, p. 870) mostraron que es probable que la acumulación de azúcar originado en la digestión del almidón y no aprovechado por la plántula inhibida sea responsable de la interrupción de la degradación del almidón en el endospermo. Si se aísla el endospermo y se conecta con una pequeña columna de yeso, la degradación del almidón sigue adelante, si el azúcar se difunde, pasando por el yeso, hasta cierta cantidad de agua, pero se inhibe si se pone la columna en poca agua, de suerte que la concentración de azúcar inhiba la hidrólisis.

Un campo en el cual ya es posible formular procesos en forma de ecuaciones es la teoría del crecimiento. Puede suponerse (von Bertalanffy, 1934) que el crecimiento se basa en la acción encontrada de procesos anabólicos y catabólicos. El organismo crece cuando la formación sobrepasa a la degradación, y se detiene cuando se equilibran ambos procesos. También puede suponerse que, en muchos organismos, el catabolismo es proporcional al volumen (peso) y el anabolismo es proporcional a la resorción, ejercida por una superficie. Esta hipótesis es apoyada por múltiples argumentos morfológicos y fisiológicos y, en casos sencillos como el de las planarias, llega a verificarse en parte merced a mediciones de la superficie intestinal (von Bertalanffy, 1940b). Si κ es una constante del catabolismo por unidad de masa, el catabolismo total será κw (donde w = peso); análogamente, con η como constante por unidad de

superficie, el anabolismo será ηs , y el aumento de peso quedará definido por la diferencia entre estas magnitudes:

$$\frac{dw}{dt} = \eta s - \kappa w. \quad (5.13)$$

A partir de esta ecuación fundamental es posible derivar expresiones que representen cuantitativamente las curvas empíricas de crecimiento y expliquen considerable número de fenómenos en este terreno. En casos muy sencillos, estas leyes del crecimiento son seguidas con la exactitud acostumbrada en los experimentos físicos. Además, el ritmo de catabolismo es calculable a partir de las curvas de crecimiento, y comparando los valores así calculados con los directamente determinados en experiencias fisiológicas se halla excelente acuerdo. Lo cual tiende a mostrar, primero, que los parámetros de las ecuaciones no son entidades matemáticamente construidas sino realidades fisiológicas; en segundo lugar, que la teoría da razón de los procesos básicos del crecimiento (cf. capítulo VII).

Este ejemplo ilustra bien el principio de la equifinalidad que antes discutimos. A partir de (5.13) se sigue, para el incremento de peso:

$$w = \left[\frac{E}{k} - \left(\frac{E}{k} - \sqrt[3]{w_0} \right) e^{-kt} \right]^3, \quad (5.14)$$

donde E y k son constantes relacionadas con η y κ , y donde w_0 es el peso inicial. El peso final estacionario es dado por $w^* = (E/k)^3$ y es, así, independiente del peso inicial. Esto también se demuestra experimentalmente, ya que el mismo peso final, definido por las constantes E y k , determinadas para cada especie, es alcanzable después de una curva de crecimiento enteramente diferente de la normal (cf. von Bertalanffy, 1934).

Es claro que esta teoría del crecimiento se sigue de las concepciones tocantes a la cinética en sistemas abiertos; la ecuación (5.13) es un caso especial de la ecuación general (5.1). La característica básica del organismo, su representación de un sistema abierto, es tenida por principio del crecimiento orgánico.

Otro campo en el que ha resultado fecundo este concepto es el del fenómeno de la excitación. Hering fue el primero que consideró los fenómenos de irritabilidad como perturbaciones reversibles del

fluir estacionario en los procesos orgánicos. En estado de reposo se compensan la asimilación y la disimilación; un estímulo provoca incremento en la disimilación, pero al descender la cantidad de sustancias descomponibles se acelera el proceso asimilador contrarrestante, hasta que se alcanza un nuevo estado uniforme entre la asimilación y la disimilación. Esta teoría ha demostrado ser extremadamente fecunda. La teoría de Pütter (1918-20), llevada adelante por Hecht (1931), considera la formación de sustancias excitantes a partir de sustancias sensibles (p. ej., la púrpura visual en los bastones del ojo de los vertebrados) y su desaparición como base de la excitación. Partiendo de las acciones encontradas de estos procesos, producción y eliminación de sustancias excitantes, se logran derivar las relaciones cuantitativas de la excitación sensoria, con base en la cinética química y la ley de acción de masas: fenómenos de umbral, adaptación a la luz y a la oscuridad, discriminación de intensidades, la Ley de Weber y sus limitaciones, etc. Una hipótesis semejante sobre las sustancias excitantes e inhibidoras y sobre un mecanismo de disimilación influido por estímulos constituye el fundamento de la teoría de Rashevsky (1938) de la excitación nerviosa por estímulos eléctricos, formalmente idéntica a la teoría de la excitación de Hill (1936). La teoría de las sustancias excitantes no se limita a los órganos de los sentidos y al sistema nervioso periférico, sino que se aplica también a la transmisión de la excitación de una neurona a otra por las sinapsis. Sin entrar en la cuestión, aún no decidida, de una teoría química o eléctrica de la transmisión en el sistema nervioso central, diremos que la primera explica muchos de los rasgos esenciales de éste, comparado con el nervio periférico, así la irreciprocidad de la conducción, el retardo de la transmisión en el sistema nervioso central, la suma y la inhibición; también aquí son posibles formulaciones cuantitativas. Por ej., Lapique desarrolló una teoría matemática de la suma en el sistema nervioso central; de acuerdo con Umrath, es interpretable por la producción y la desaparición de sustancias excitantes.

Podemos decir, pues, primero, que las vastas áreas del metabolismo, el crecimiento, la excitación, etc., empiezan a fundirse en un campo teórico total, bajo la guía del concepto de sistema abierto; luego, que gran número de problemas y posibles formulaciones cuantitativas se desprenden del concepto.

A propósito de los fenómenos de excitación hay que mencionar que el concepto también tiene importancia para problemas farmaco-

lógicos. Loewe (1928) aplicó el concepto de organismo como sistema abierto al análisis cuantitativo de efectos farmacológicos y derivó las relaciones cuantitativas para el mecanismo de acción de algunos medicamentos (sistemas de «adición», «descenso», «bloqueo»).

Por último, problemas similares a los discutidos con respecto al organismo individual se presentan también a propósito de entidades supraindividuales que, entre vida y muerte, inmigración y emigración continuas, representan sistemas abiertos de naturaleza superior. De hecho, las ecuaciones deducidas por Volterra para la dinámica de poblaciones, las biocenosis, etc. (cf. D'Ancona, 1939), pertenecen al tipo general discutido arriba.

En conclusión, puede afirmarse que la consideración de fenómenos organísmicos según la concepción discutida, de la cual se expusieron algunos principios generales, ya ha demostrado su importancia en la explicación de fenómenos específicos de la vida.

VI. El modelo del sistema abierto

La máquina viviente y sus limitaciones

La presente discusión se iniciará con una de esas preguntas triviales que con harta frecuencia son demasiado difíciles de responder científicamente: ¿cuál es la diferencia entre un organismo normal, uno enfermo y uno muerto? Desde el punto de vista de la física y la química, la respuesta vendrá a ser que la diferencia no es definible sobre la base de la llamada teoría mecanicista. Hablando en términos de física y química, un organismo vivo es un agregado de gran número de procesos que, suponiendo suficiente esfuerzo y conocimiento, es definible mediante fórmulas químicas, ecuaciones matemáticas y leyes de la naturaleza. Es cierto que tales procesos difieren en un perro sano, uno enfermo y otro muerto, pero las leyes de la física no sacan a la luz diferencia alguna, no les interesa que los perros vivan o mueran. Nada cambia aunque tomemos en consideración los últimos resultados de la biología molecular. Una molécula de DNA, proteína o enzima, o un proceso hormonal, vale tanto como otra u otro; cada cual está determinado por leyes físicas y químicas, no hay molécula o proceso mejor, más saludable o normal que otro.

No obstante, existe una diferencia fundamental entre un organismo vivo y uno muerto; de ordinario no tenemos la menor dificultad en distinguir un organismo viviente y un objeto inerte. En un ser vivo hay innumerables procesos químicos y físicos «ordenados» de tal manera que permiten al sistema vivo persistir, crecer, desarrollarse, reproducirse, etc. Pero ¿qué significa esa noción de «orden»,

que buscaríamos en vano en un texto de física? A fin de explicarlo y definirlo necesitamos un modelo, una construcción conceptual. Un modelo así vino utilizándose desde los comienzos de la ciencia moderna. Era el modelo de la máquina viva. De acuerdo con el estado de arte, el modelo era objeto de diferentes interpretaciones. Cuando en el siglo xvii Descartes introdujo el concepto del animal como una máquina, sólo existían *máquinas mecánicas*, de modo que el animal era un complicado artefacto de relojería. Borelli, Harvey y otros de los llamados iatrofísicos examinaron las funciones de los músculos, del corazón, etc., mediante modelos mecánicos de palancas, bombas y así por el estilo. Todavía se asiste a esto en la ópera: en *Los cuentos de Hoffmann*, la bella Olimpia resulta ser una muñeca construida con maña, un autómatas, como se decía entonces. Más tarde aparecieron la máquina de vapor y la termodinámica, lo cual hizo que el organismo fuese concebido como una *máquina térmica*, noción que llevó a cálculos calóricos y a otras cosas. Sin embargo, el organismo no es una máquina térmica que transforme la energía del combustible en calor y luego en energía mecánica. Es, más bien, una *máquina quimiodinámica*, que transforma directamente la energía del combustible en trabajo efectivo, hecho en el cual se funda, p. ej., la teoría de la acción muscular. Últimamente se han puesto en primer plano máquinas que se autorregulan, termostatos, proyectiles que buscan el blanco y los servomecanismos de la tecnología moderna. Con ello el organismo pasó a ser una *máquina cibernética* que explica muchos fenómenos homeostáticos y similares. El paso más reciente alude a *máquinas moleculares*. Cuando se habla de la «fábrica» del ciclo de oxidación de Krebs, o de las mitocondrias como «plantas de energía» de la célula, se quiere decir que estructuras como máquinas determinan en nivel molecular el orden de las reacciones enzimáticas; análogamente, es una micromáquina la que transforma o traduce el código genético del DNA cromosómico a proteínas específicas y a fin de cuentas a un organismo complejo.

A pesar de su éxito, el modelo del organismo como una máquina tiene sus dificultades y sus limitaciones.

Está, ante todo, el problema del *origen de la máquina*. El viejo Descartes no tropezaba aquí con problema alguno, pues su máquina animal era creación de un divino relojero. Pero ¿de dónde salen las máquinas en un universo de acontecimientos fisicoquímicos no dirigidos? En la naturaleza no se dan espontáneamente relojes,

máquinas de vapor y transistores. ¿De dónde vienen las máquinas vivientes, infinitamente más complicadas? Conocemos, claro está, la explicación darwiniana, pero sigue en pie una duda, particularmente en quienes tienen mente física; perduran cuestiones que no acostumbran ser planteadas ni contestadas en los textos de evolución.

En segundo lugar, tenemos el problema de la *regulación*. Sin duda, son concebibles máquinas que se autorreparen en términos de la moderna teoría de los autómatas. El problema se presenta con la reparación y la regulación después de perturbaciones arbitrarias. ¿Puede una máquina —un embrión, digamos, o un cerebro— estar programada para la regulación no después de determinada perturbación o conjunto finito de perturbaciones, sino después de perturbaciones en número indefinido? La llamada máquina de Turing puede, en principio, resolver aun el proceso más complejo en etapas que, si son finitas en número, son reproducibles por un autómata. Sin embargo, acaso el número de etapas no sea ni finito ni infinito sino «inmenso», o sea superior al número de partículas o de acontecimientos posibles en el universo. ¿Dónde queda el organismo como máquina o autómata? Es bien sabido que los vitalistas recurrieron a tales regulaciones orgánicas como pruebas de que la máquina orgánica es controlada y reparada por agentes suprafísicos, a los que se llamaba entelequias.

Todavía más importante es otra tercera cuestión. El organismo vivo es mantenido en continuo *intercambio de componentes*; el metabolismo es una característica básica de los sistemas vivientes. Estamos, como si dijéramos, ante una máquina compuesta de combustible que continuamente se consume y, sin embargo, aquélla se preserva. No hay máquinas así en la tecnología de hoy. En otras palabras: una estructura del organismo como máquina no puede ser la razón última del orden de los procesos vitales porque la máquina misma es mantenida en un fluir ordenado de procesos. Por lo tanto, el orden primario tiene que residir en el proceso mismo.

Algunas características de los sistemas abiertos

Expresamos esto diciendo que los sistemas vivos son básicamente sistemas abiertos (Burton, 1939; von Bertalanffy, 1940a; capítulo v). Un sistema abierto es definido como sistema que intercambia materia con el medio circundante, que exhibe importación y exportación, constitución y degradación de sus componentes materiales.