

Capítulo 3

La ciencia y el movimiento de sistemas

El método de la ciencia ha adquirido poder suficiente como para crear la perspectiva moderna; y, en gran parte, la explotación de la ciencia en la tecnología occidental ha creado al mundo moderno en un sentido físico. Este ascenso se debe al hecho de que, indudablemente, la poderosa combinación entre el pensamiento racional y la experimentación funcionan. El método proporciona un conocimiento diferente, en especie, de aquel que se deriva de consultar el oráculo en Delfos, interpretar las entrañas de cabras sacrificadas, el hacer horóscopos o el voltear las cartas del Tarot. El hecho de que en las sociedades occidentales en la década de los setentas haya una reacción en contra de la ciencia, evidenciada, por ejemplo, en las polémicas de Roszak (1970, 1973) y en el festivo negocio de las cartas de Tarot llevado a cabo en librerías universitarias, es en sí mismo un testamento del dominio de la ciencia. El culto presente de la sinrazón no es especialmente una reacción sorprendente ante el éxito increíble del culto de la razón como se encarna en la ciencia moderna, ya que ciertos frutos de la ciencia y la tecnología están, se considera únicamente en un nivel material. Pero el método de la ciencia no es todopoderoso, aun en un nivel material, y hay mucho por aprender mediante el examen de las limitaciones del método científico, y no porque un examen de las fronteras de la ciencia, llevado a cabo en el espíritu de indagación racional de la ciencia en sí, pueda proporcionar una base más civilizada para el cambio cultural que aquel que acaso ofrezca un culto insensato de la sinrazón. El problema crucial que encara la ciencia reside en su capacidad para hacer frente a la complejidad. La segunda regla de Descartes para “dirigir adecuadamente la razón de uno”, por ejemplo, dividir los problemas que han de examinarse en partes separadas (el principio más central a la práctica científica) asume que esta división no distorsionará el fenómeno que se estudia. Asume que los componentes del todo son los mismos cuando se les examina individualmente como cuando asumen su rol en el todo, o que los principios que gobiernan el ensamblado de los componentes para formar el todo son, en sí mismos, directos. Ahora, sobre la base del éxito de la ciencia física de hoy, sabemos que éstas son al parecer suposiciones razonables, al menos para muchas de las regularidades físicas del universo. Suponga, por ejemplo, que separamos al fenómeno del calor de la complejidad total del mundo físico, y suponga que seguimos algunos pasos para descubrir en el laboratorio las leyes que gobiernan la transferencia del calor. La evidencia subsecuente sugiere que, para propósitos de todos los días, esta separación o reducción es legítima. Esto lo demuestra el hecho de que en el mundo real, en el cual la transmisión del calor se mezcla con otros fenómenos físicos como la luz, el sonido y la acción de las fuerzas gravitacionales, hasta donde concierne al calor, las mismas leyes de la transmisión del calor, establecidas en el laboratorio, se obedecen. Este hallazgo justifica la reducción inicial, y esta separabilidad de muchos fenómenos físicos es ahora una parte incuestionable de nuestra cosmovisión. Pero si vamos más allá de las regularidades físicas del universo y pasamos a fenómenos aparentemente más complejos (por ejemplo, los de la sociedad humana) las respuestas a cuestiones sobre cómo hacer la separación, y cómo saber si, finalmente, es legítimo hacer esto, son respuestas más difíciles de obtener. Si la investigación se aboca a la “transferencia de calor”, entonces esto no es difícil; ahora sabemos cómo establecer fronteras alrededor del área de investigación y cómo diseñar experimentos. Sin embargo, si la investigación es acerca de, por decir, el fenómeno de la “votación” estas cosas no son tan claras; cómo separar el fenómeno, qué incluir, qué no incluir, etc., son cuestiones mucho más difíciles de definir.

La pregunta interesante es: ¿hasta qué punto puede el método de la ciencia enfrentarse a la complejidad?; ¿dónde cae el método y por qué? Este capítulo examina algunas de las limitaciones del método de la ciencia, en tanto se incrementa la complejidad de la materia sustancial. Después de examinar algunos de los problemas de la complejidad dentro de las ciencias físicas, se centra la atención sobre los problemas de otras dos áreas ricas en complejidad: las ciencias sociales y los “problemas en el mundo real”; estos últimos considerados como problemas de “administración” y que definen a dicho término muy

vagamente. Esto es como una respuesta a los problemas de complejidad que desarrolla la inteligencia de sistemas.

Problemas para la ciencia: complejidad

La inspección superficial del mundo sugiere que éste es un complejo gigante con conexiones densas entre sus partes. No podemos enfrentarnos a él en esa forma y nos vemos obligados a reducirlo en áreas separadas que podemos examinar individualmente. Nuestro conocimiento del mundo se ve así necesariamente dividido en diferentes “materias” o “disciplinas” y, en el curso de la historia, éstas cambian de igual manera en que cambia nuestro conocimiento. Debido a que nuestra educación está dirigida, desde el inicio, en términos de esta división en distintas materias, no es fácil recordar que las divisiones fueron hechas por el hombre y son arbitrarias. No es la naturaleza quien se divide a sí misma en física, biología, psicología, sociología, etc.; somos nosotros quienes imponemos estas divisiones a la naturaleza, y ellas impregnan tanto nuestro pensamiento que encontramos difícil el ver la unidad que yace bajo las divisiones. Pero dado que nuestro conocimiento se tiene que disponer de esta manera (y esto es inevitable, dada nuestra capacidad limitada para abordar el todo), entonces es útil, con miras en la coherencia, el disponer la clasificación del conocimiento de acuerdo con algunos principios racionales. Se han propuesto muchas clasificaciones posibles, basadas en un número de principios diferentes, y sería tonto esperar que una versión fuese aceptada en consenso, dados los diferentes propósitos para los cuales la clasificación pueda servir.

Kotarbinski (1966) enfatiza que una motivación principal para inventar las clasificaciones del conocimiento ha sido el interés profesional de los bibliotecarios ¡para ordenar las bibliotecas! Se sabe que Aristóteles dio consejos sobre la organización de una biblioteca; el catálogo de la gran biblioteca de Alejandría incluía 120 capítulos, basados aparentemente en la naturaleza del papel de los autores: poetas, abogados, historiadores, oradores. Francis Bacon propuso una clasificación, como parte de este esquema, para la investigación científica organizada, que iba a transformar la suerte del hombre. Ampere, decidido a enseñar física, decidió que era necesario establecer las líneas de demarcación de esa disciplina y por ello propuso una clasificación de las ciencias para así colocar a la física dentro de dicha clasificación.

Para mis propósitos es útil el recordar la clasificación de las ciencias que propuso Comte en el siglo XIX. El propósito didáctico de Comte era el de establecer una hasta entonces inexistente ciencia de la sociedad, que él bautizó como “sociología”. (Véase Kolakowski, 1972, si desea un informe de la filosofía “positivista” de Comte y su historia subsecuente; Abraham, 1973, reimprime grandes extractos de los trabajos más importantes de Comte.) El objetivo espectacular de Comte fue el de establecer una organización uniforme de la totalidad del conocimiento humano y proporcionar así una base para la nueva ciencia de la sociología, a través de la cual fuese posible transformar la vida social. La clasificación, por supuesto, también formaría la base de la enseñanza y, mediante ella, los estudiantes absorberían una imagen coherente de la ciencia como un todo. La doctrina de Comte establecía que el pensamiento humano en cualquier materia atravesó por tres fases: una fase *teológica* dominada por creencias fetichistas y religiones totémicas; una fase *metafísica* en la cual las causas sobrenaturales son remplazadas por “fuerzas”, “calidades”, “propiedades”; y finalmente una fase *positiva* en la cual el objetivo es descubrir las leyes universales que gobiernan a los fenómenos, llevándole a la máxima certeza que el hombre espera alcanzar. Comte arguyó que las ciencias todas habían atravesado o estaban atravesando esta secuencia. Por ejemplo, la astronomía emergió de la niebla metafísica con el trabajo de Copérnico; Kepler y Galileo; la química atravesó su fase teológica (cuando era alquimia) y alcanzó el estatus de la ciencia positiva en el siglo XVIII, la biología en el siglo XIX dio la espalda a la explicación teológica y la explicación mediante “fuerzas vitales” y comenzó la investigación positiva de las leyes relativas a los organismos en un medio. Este informe de la historia de las ciencias condujo a Comte a colocar las ciencias en un orden natural que era el siguiente: matemáticas, astronomía, física, química, las ciencias biológicas y, finalmente, la sociología. Esta secuencia, en la cual Comte habría hecho que se enseñasen las ciencias, representó la visión de que cada ciencia, más compleja que la precedente, presupone las ciencias menos complejas que la preceden, pero muestra sus propias leyes irreductibles. La unidad de las ciencias en este esquema se origina de sus interdependencias como aspectos diferenciados históricamente de una realidad social individual que va a ser el objetivo de esta nueva ciencia de la sociedad.

Los principios detrás de la clasificación son: el orden histórico de la emergencia de las ciencias; el hecho de que cada una descansa sobre la que le precede y prepara el camino para la

que sigue a continuación; el grado en incremento de complejidad de la materia sustantivo y la facilidad en incremento por la cual los hechos estudiados por una ciencia en particular pueden cambiar. (Con respecto de este último principio, los “hechos” de la ciencia social están cambiando constantemente; algunos de los hechos de la biología cambian con la evolución en un período relativamente corto; pero las propiedades determinadas experimentalmente del ácido sulfúrico y hechos químicos similares permanecen relativamente sin cambios, como lo hacen los hechos de la física.) La clasificación sigue siendo, con pocas modificaciones, un marco de trabajo útil para el examen de algunas de las dificultades y limitaciones del método científico. Las modificaciones contemplan la inclusión de la psicología (que Comte omitió) como una ciencia que una a la biología con las ciencias sociales, y la exclusión de las matemáticas, consideradas no como una ciencia por derecho propio, sino como un lenguaje que cualquier ciencia puede utilizar, y que se emplea más a menudo entre más descendamos por la jerarquización. Las matemáticas son con mucho el lenguaje de la física moderna, y la química se vuelve cada vez más matemática; pero, en las ciencias sociales, las matemáticas generalmente aparecerán en forma de estadística, que se ha desarrollado para enfrentarse a las mediciones y cantidades muy confusas. Esto nos da, secuencialmente, una clasificación de las ciencias experimentales en la física, la química, la biología, la psicología y las ciencias sociales. En esta secuencia, la física es la ciencia básica, que se concentra en los conceptos más generales, por ejemplo masa, movimiento, fuerza y energía. Las reacciones químicas obviamente ocasionan estos fenómenos, y se explican cada vez más en sus propios términos, pero cuando el gas ácido hidroclorehídrico y la amonía se mezclan, y aparece un sólido blanco que no se había presentado antes, estamos frente a un fenómeno que, intuitivamente, es más complejo que los fenómenos de la física. Y aunque un fenómeno biológico, por ejemplo el crecimiento de una planta a partir de una semilla genera mucha química (así como física), la capacidad reproductiva de la planta vuelve a introducir un nuevo nivel de complejidad. La psicología, y el concepto de la conciencia, introducen un nivel más alto todavía, y la vida social exhibe niveles aún más altos.

En la discusión del capítulo previo es la física la que triunfa más claramente como ciencia. Ejemplifica con mayor claridad el método científico, y el examen de las dificultades principales para este método de obtención de conocimiento se vuelve un examen de grado con el cual el reduccionismo, repetibilidad y refutación pueden caracterizar el estudio de fenómenos cada vez más complejos en tanto ascendemos en la jerarquía. ¿Puede el método científico enfrentarse a fenómenos más complejos que los de la física? ¿Dónde se colapsa?

Un ejemplo interesante de una ciencia que se enfrenta con una nueva complejidad sucedió en la química durante el siglo pasado. En ese entonces, los químicos aislaron, purificaron y determinaron los constituyentes de los compuestos de carbón complejos, de los que se sabía caracterizaban el material vivo: los denominados químicos “orgánicos”. Tales moléculas, como la brucina, $C_{23}H_{26}O_4N_2$, analizada en 1831, fueron tan complejos que se supuso que se podrían fabricar únicamente con la intervención de una “fuerza vital” misteriosa que, se suponía, todos los organismos vivos poseían. La controversia vitalista surgió cuando Wöhler fue capaz de mostrar que un compuesto orgánico conocido (la urea: NH_2CONH_2) se podía fabricar al calentar simplemente la sustancia cianato de amonio (NH_4CNO), que se había fabricado a partir de materiales de inicio completamente inorgánicos. Esa transformación fue repetible y otras reacciones similares la siguieron. Pronto fue aceptado que la característica crucial de los químicos orgánicos era su *estructura*, y este episodio es un ejemplo satisfactorio del reduccionismo, pues los hallazgos experimentales condujeron a la eliminación de la necesidad por “explicar” la complejidad mediante la invocación del vitalismo.

De manera interesante, la misma controversia vitalista irrumpió en la biología bastante después. En las décadas de 1880 y 1890. Roux había sugerido que las “partículas” hereditarias en el huevo de un organismo se dividían desigualmente durante las divisiones de la célula que forman el embrión de células múltiples a partir del huevo de una sola célula. Así se suponía que diferentes partes de un embrión contendrían diferentes potencialidades hereditarias. Driesch, que trabajaba en la Estación Zoológica en Nápoles, dividió los huevos de un erizo marino cuando éstos estaban en el estadio de dos células. Permitió que cada célula se desarrollara por separado y supuso que obtendría embriones deformados. Para su asombro, cada célula produjo una larva de erizo marino normal, aunque un poco pequeña: descubrimiento que refuta la hipótesis de Roux. Driesch tuvo que concluir que las células tenían una habilidad inherente para adaptarse a las circunstancias variables; un embrión en su estadio temprano de desarrollo al parecer era un todo autoajutable. Sugirió que una célula debía ser considerada como un “sistema equipotencial armónico” (Allen, 1975). Algunos años después Driesch llevó a cabo algunos experimentos todavía más importantes con otros embriones. Él demostró, por ejemplo,

que si la futura cola de un embrión de tritón se removía y se insertaba en una posición donde normalmente crecería una pierna, la que se suponía era una cola en esta nueva posición, ¡crecía en forma de una pierna! En la década de 1920, los experimentos demostraron que, en un estadio posterior de desarrollo, las partes de un embrión estaban aparentemente comprometidas con su curso de desarrollo. El tejido joven del muñón de una cola de tritón amputada se convertía en una pierna que se injertaba en una posición de pierna, pero el tejido más maduro crecía en forma de cola donde fuese injertado (Koestler, 1945). Estos resultados causaron consternación entre los biólogos. Si el desarrollo de los organismos era controlado determinísticamente por las leyes psicoquímicas, como se creía firmemente que era el caso, ¿cómo podrían explicarse estos resultados? Era casi imposible el evitar describir el problema en términos antropomórficos: ¿cómo “sabía” el tejido de cola que en su nueva posición debería crecer en forma de pierna? ¿Cómo “sabía” que después de cierto punto ya no podría crecer en otra cosa que no fuera una cola y cómo podría “persuadir” al tejido anfitrión para que se comportara adecuadamente? La controversia entre los vitalistas y los mecanicistas, que surgió hacia finales del siglo, continuó hasta la década de 1930. Hans Driesch y los vitalistas creyeron que los resultados de la embriología experimental establecían que la vida involucraba algo más allá de lo físico. Driesch mismo perdió la esperanza de hallar una explicación causal-mecánica y apoyo en *La historia y teoría del vitalismo*, una noción aristotélica por la cual la célula huevo contenía un órgano vitalístico, una idea misteriosa del organismo completo, que él denominó como *entelequia*, y que ninguna cantidad de experimentación podría analizar o describir.

El vitalismo de Driesch fue un verdadero resurgimiento de la antigua teoría animística de Aristóteles, incluyendo al concepto y al término *entelecheia*, con lo que significaba la idea completa y perfecta del organismo que existe antes de la realización material verdadera de éste (Montalenti, 1974).

Driesch realmente renunció a la biología experimental y se convirtió en algo así como un filósofo místico. Mientras tanto la controversia del vitalismo alcanzó el estancamiento, y la mayoría de los biólogos se referían a la invocación de la *entelequia* como una solución falsa. Los biólogos llegaron a aceptar que la clave para explicar el material viviente residía en el grado de organización de éste, y creyeron y tuvieron la esperanza de que el desenmarañamiento experimental eventual de los mecanismos moleculares en las células de los materiales vivientes pudiese proporcionar la explicación para el comportamiento vital. Los triunfos recientes de la biología molecular han hecho esto hasta cierto punto (Monod, 1972; Watson, 1968). Las “partículas hereditarias” de Roux y las *entelequias* de Driesch ahora pueden en parte equipararse con “programas” que direccionan el desarrollo y que están codificados específicamente en la secuencia de bases orgánicas, dentro de las moléculas de cadena larga denominadas ácidos nucleicos. Existe mucho todavía por aprender acerca de la macrobiorganización del desarrollo de órganos individuales en un organismo (Pattee, 1970), pero los biólogos aceptan que en principio el problema está resuelto, y la solución se ha obtenido sin tener que invocar a algo que esté más allá de los principios conocidos de la química física. Así que el vitalismo, que habrá muerto finalmente cuando el material viviente sea creado en el laboratorio, como se discutió en el capítulo anterior, es todavía una doctrina sin seguidores.

En los dos ejemplos descritos anteriormente vemos que las ciencias de la química y la biología se enfrentan a nuevas complejidades en sus materias sustantivas. La reacción es típicamente científica: evitar la generación de explicaciones para lo desconocido en términos de lo conocido. Este es un enfoque reduccionista sensato, un sabio empleo de la rasuradora de Ockham que debe aplaudirse. En las instancias presentes el enfoque fue un éxito en el caso de la química, y se cree generalmente que no está lejos del éxito final en el caso de la biología y el vitalismo. Sin embargo, estos pasajes de historia dirigen la atención hacia algunos problemas interesantes que continúan incluso después de que se han encontrado explicaciones reduccionistas para describir los mecanismos de los nuevos fenómenos.

El principal acertijo sigue siendo que un problema nuevo, por ejemplo el de la complejidad en incremento de las moléculas orgánicas en comparación con las inorgánicas, se considera como *un problema de la química* y del nivel particular de fenómenos a los cuales se enfrenta esa ciencia. Al explicar un fenómeno de la química en términos de la física de las moléculas (las masas, energías y campos de fuerza) se proporciona una explicación del fenómeno observado sin tener que introducir conceptos nuevos, y debemos alegrarnos de esta reducción; pero ésta no hace nada por excusar el hecho del que el fenómeno de la química existe (y que se le puede investigar experimentalmente) en un nivel más alto de complejidad del que se

encuentra en la física. La física puede proporcionar una descripción del mecanismo de algunos fenómenos químicos, pero no puede explicar la existencia de problemas de química como esos. El acertijo que aún queda es el de la aparente existencia de una jerarquía de niveles de complejidad que nosotros encontramos conveniente enfrentar mediante una jerarquía de ciencias separadas. Una vez más, en un nivel arriba de la química, los problemas del desarrollo de los embriones y de la herencia son problemas de la biología. Las explicaciones en términos de la química, aunque bienvenidas, no excusan a la biología: nos quedamos con un nivel de complejidad que se caracteriza por sus propios problemas autónomos. Popper (1974) en una sección denominada “Darwinismo y metafísica” de su “autobiografía intelectual” al parecer enfatiza el mismo punto cuando escribe:

Conjeturo que no existe un proceso biológico que no se pueda considerar en correlación detallada con un proceso físico o que no se pueda analizar progresivamente en términos psicoquímicos. Sin embargo, ninguna teoría psicoquímica puede explicar la emergencia de un nuevo problema... los problemas de los organismos no son físicos: los problemas no son ni cosas físicas, ni leyes físicas, ni hechos físicos. Son realidades biológicas específicas; son “reales” en el sentido en que sus existencias pueden ser la causa de efectos biológicos.

Dada la desordenada riqueza de los “efectos biológicos”, quizá no sea sorprendente que los biólogos, mucho más que los químicos, hayan estado conscientes del hecho de que un problema sin resolver se presenta a la ciencia mediante la simple existencia de un grupo de fenómenos que estén en orden superior con respecto de aquellos de la química y la física. La existencia del problema de la emergencia de fenómenos nuevos en niveles superiores de complejidad es en sí un problema mayúsculo para el método de la ciencia, y un problema que el pensamiento reduccionista no ha podido resolver.

Pantin, quien describe otro aspecto del problema de la complejidad para la ciencia (1968), hace una útil distinción entre las ciencias “restringidas” y “no restringidas”. En una ciencia restringida, por ejemplo la física o la química, se estudia un rango limitado de fenómenos; son posibles los experimentos reduccionistas bien diseñados en el laboratorio y es probable que hipótesis de largo alcance, expresadas matemáticamente, puedan verificarse mediante mediciones cuantitativas. Entre más amplias y más precisas sean las predicciones cuantitativas, más grande es la posibilidad de falla, y por ello se deposita la mayor confianza posible en una hipótesis que en verdad ha aprobado una verificación severa. En una ciencia no restringida, por ejemplo la biología o la geología, los efectos a estudiarse son tan complejos que los experimentos diseñados con controles a menudo no son posibles. Los modelos cuantitativos son más vulnerables y la probabilidad de que factores desconocidos dominen las observaciones es más grande. Pantin escribe:

Las ciencias físicas son restringidas porque ellas descartan desde el principio una gran cantidad de la rica variedad de fenómenos naturales. Al seleccionar sistemas simples para examinarlos, introducen un sesgo sistemático en cualquier visión del mundo natural que se base en ellos. Por otra parte, dicha selección les permite hacer progreso rápido y espectacular con la ayuda de modelos matemáticos de alta calidad intelectual. En contraste, el avance en las ciencias no restringidas como la geología y la biología necesariamente es más lento. Existen tantas variables que sus hipótesis necesitan revisión continua.

Obviamente existe la posibilidad de que el enfoque científico basado en el reduccionismo, la repetibilidad y la refutación se hunda cuando se enfrente con fenómenos extremadamente complejos que generen más variables interactivas de las que puede manejar un científico en sus experimentos. Las ciencias sociales son todas “no restringidas” en el sentido de Pantin, y presentan problemas considerables para el método de la ciencia. Y ellas introducen un nuevo tipo de dificultad que va más allá de la mera complejidad.

Problemas para la ciencia: la ciencia social

Incluso cuando las ciencias naturales enfrentan el problema de la complejidad extrema, los científicos profesionales interesados están convencidos de que no hay implicada una disputa fundamental de principio. Los climatólogos y los meteorólogos por ejemplo, trabajan con sistemas grandes y complejos que involucran más variables de las que se pueden manejar analíticamente, y pasará al parecer mucho tiempo antes que los meteorólogos puedan indicarnos si va o no a llover en Bolton-le-Sands, Lancashire, Inglaterra, el próximo jueves. Por otra parte, los pronósticos del patrón climatológico general para Inglaterra como un todo ahora se hace con un mes de anticipación, y se están mejorando en calidad. Los problemas a enfrentarse todavía son de un tipo identificable, relativos a la instrumentación, la recolección de datos y al análisis de datos, más que ser disputas fundamentales que puedan arrojar dudas sobre la posibilidad de un pronóstico climatológico exacto. El futuro de la meteorología como ciencia ciertamente no es un asunto en debate.

Esta es una situación muy diferente de la que hay en las ciencias no restringidas que llamamos “sociales”. El estatus de las disciplinas como la antropología, la economía, sociología, ciencia política, etc., *como ciencias* es una cuestión todavía problemática. Para un lego, por ejemplo, la inspección inicial de la literatura sobre sociología le da la impresión de que el fuerte de ésta son los hallazgos sociales del tipo que se pueden recolectar al pedirle a la gente que llene cuestionarios; de ser relativamente débil en informes sustantivos que son el resultado de los sociólogos que están haciendo sociología en la forma en que los químicos hacen química, y fuerte relativamente sobre discusiones de la naturaleza de la sociología; que constituye una “explicación” en sociología, si es posible o no una sociología libre de valor, y preguntas similares (si desea ejemplos británicos recientes, véase Winch, 1958; Rex, 1961; Cohen, 1968; Ryan, 1970, 1973; Emmet y MacIntyre, 1970; Gellner 1973; Giddens, 1974, 1976, 1979; Keat y Urry, 1976). Fue un sociólogo, Cohen, ningún intruso, quien escribió “... existe una tendencia triste por la que los teóricos sociales discuten la naturaleza de la teoría social en vez de discutir la naturaleza de la realidad social”. En contraste, la literatura de una ciencia natural como la química fuertemente se ve dominada por contribuciones sustantivas dentro de la disciplina; están ausentes visiblemente la simple recolección de datos y la discusión del estatus de la química.

Este interés por preguntas acerca en vez de *dentro* de las disciplinas de la ciencia social es una indicación no de que la ciencia social atraiga a los diletantes, sino más bien de que problemas excepcionalmente difíciles surgen cuando los métodos desarrollados para investigar el mundo natural que existe fuera de nosotros se aplican a los fenómenos sociales de los cuales nosotros somos parte. Los fundadores de la ciencia social no tenían duda de que la nueva ciencia iba a ser ciencia a la imagen de las ciencias naturales. Comte vio la materia que él denominó “sociología” como la cima de la pirámide de todas las ciencias. Emile Durkheim, se refirió a la nueva palabra como un “neologismo bárbaro”, sin embargo buscó hacer de la sociología una “ciencia distinta y autónoma”. Fue asumido que el empiricismo aplicado a los hechos de la vida social daría por resultado generalizaciones y predicciones sobre el patrón de la ciencia natural. Esto todavía no ha sucedido, y aunque un siglo no es mucho tiempo en la historia de una idea, al parecer el hiato en el desarrollo sustantivo de las ciencias sociales se debe al tipo especial de dificultades que ellas enfrentan. Cerca del final de esta vasta explicación de la lógica de la explicación científica, Ernest Nagel (1961) fija su atención en las ciencias sociales y encuentra que la posición es la siguiente:

... en ningún área de la indagación social se ha establecido un cuerpo de leyes generales, comparable con las destacadas teorías en las ciencias naturales en la esfera del poder de explicación o en la capacidad por generar predicciones precisas y confiables... muchos científicos sociales son de la opinión, incluso, de que el tiempo aun no ha llegado para las teorías diseñadas que expliquen sistemáticamente no sólo rangos muy limitados de fenómenos sociales... los científicos sociales continúan en desacuerdo acerca de disputas centrales sobre la lógica de la Indagación social... La tarea importante, seguramente, es alcanzar alguna claridad en las disputas metodológicas fundamentales y en la estructura de explicaciones dentro de las ciencias sociales...

Después de un cuidadoso examen de las dificultades formidables que encara la ciencia social, Nagel concluye que los problemas para determinar las explicaciones sistemáticas de fenómenos sociales no son *en lógica* insuperables. Admite que los “problemas no se resuelven simplemente demostrando que son necesariamente imposibles de resolver”, y el hecho es que los

problemas de una ciencia social construida con el patrón de la ciencia natural han sido difícilmente resueltos.

Es obvio que un aspecto de estos problemas es ése ya encontrado en la biología y otras ciencias no restringidas: la complejidad de la materia sustancial. Los fenómenos involucrados tienen densas conexiones entre muchos aspectos diferentes, que hacen difícil lograr la reducción requerida para un experimento controlado significativo. Al igual que en algunas de las ciencias físicas no restringidas, por ejemplo la geología, las oportunidades para la experimentación diseñada que proporcione resultados inequívocos son muy limitadas. Las instituciones sociales no están disponibles para la experimentación, incluso aunque se pudieran diseñar experimentos completos con controles. Pero en la ciencia social no es sólo la complejidad y esta no disponibilidad de objetos experimentales es lo que ocasiona problemas. Existe también el gran problema de la naturaleza especial de los fenómenos a estudiarse.

Nuestro conocimiento del mundo adquirido mediante la ciencia (¿Y quizá el mundo mismo?) al parecer muestra simetrías, patrones, regularidades. Parecería sorprendente que los fenómenos sociales no tuviesen un patrón similar. En verdad, en una inspección con sentido común, obviamente lo tiene, ya que la vida social no sería posible si el comportamiento de nuestros congéneres no satisficiera en general nuestras expectativas. Pero dada la “desordenada” naturaleza de los fenómenos sociales como nos parecen ser, podemos esperar que los hallazgos de un enfoque científico a la investigación de la realidad social tengan ciertas características que los distingan de los hallazgos adquiridos mediante la investigación del mundo físico llevada a cabo por las ciencias naturales.

En primero, debemos esperar que toda generalización sea imprecisa si la comparamos con, por decir, la ley de Ohm. Ésta se refiere a una bien definida relación entre variables bien definidas que se sustenta en el medio muy especial de un circuito eléctrico, que a su vez está definido con precisión. Compare esto con el hallazgo de un sociólogo europeo quien dice que al dictar sentencia a los criminales algunos jueces tienden a tomar más en cuenta la clase social del criminal que la naturaleza misma de la ofensa. MacIntyre (en Magee, 1971) describe esta situación:

Cuando preguntamos qué es lo que sigue, qué generalizaciones se pueden estructurar, no somos claros en absoluto, porque no tenemos bien claro cómo debemos entender los fenómenos de un sistema legal de tal forma que podamos generalizar acerca de ellos, y esto se debe a que no tenemos bien claro el nivel en el cual debemos buscar una teoría. ¿Una teoría de comportamiento evaluativo en general? O ¿una teoría del comportamiento de los oficiales, por ejemplo los jueces? ¿Cómo debemos agrupar los fenómenos de la vida social? ¿Cómo debemos categorizarlos de tal forma que podamos comenzar a estructurar explicaciones? No lo sabemos.

El punto es que en el caso de la relación entre el voltaje aplicado, la resistencia del circuito, y el flujo de corriente en un circuito eléctrico, sí *sabemos* cómo “agrupar” y “categorizar” los fenómenos. Podemos reducir el contexto de estos fenómenos a una forma simple explícita, generalizar la ley de Ohm, e invitar a todo aquél que esté interesado a verificar los hallazgos experimentales por sí mismo. La variedad de puntos de vista posibles que siempre están disponibles confusamente en el caso de los fenómenos sociales, está drásticamente reducida en el caso de la ciencia natural.

Muy relacionada con la disponibilidad de muchas posibles interpretaciones de los fenómenos sociales está la segunda característica que distinguirá los hallazgos de la ciencia social de aquellos de la ciencia natural: la naturaleza especial del componente del sistema estudiado por el científico social. El componente es el ser humano individual, e incluso si lo despersonalizamos como un “actor” en un “rol” será un participante activo en los fenómenos investigados, atribuyendo significados y modificando la situación en una forma única potencialmente. El químico que estudia las propiedades del amoníaco no puede diferenciar una molécula de amoníaco de otra molécula de amoníaco; él puede asumir una similitud total entre las propiedades de una molécula y la que sigue, y puede estar totalmente seguro de que es posible dirigir el experimento que él quiera: ¡las moléculas individuales no van a manipularlo a él! Incluso el biólogo que estudia el comportamiento animal está en una posición simple en comparación con el científico social. El comportamiento animal está programado aparentemente en un grado más alto del que nos atreveríamos a asumir (felizmente) para el ser humano. El científico social se encuentra en la misma posición en la que un biólogo que estudia el ciclo de vida del cuclillo se vería si, en un año, por un cambio, algunos cuclillos de pronto construyeran

nidos por su cuenta y degustasen la experiencia de incubar huevos y ayudar a crecer a los cuclillos jóvenes. El cuclillo de hecho no se comporta en esta manera errática, y los etólogos no han encontrado necesario el evocar la idea de que los fenómenos estudiados se ven afectados por la atribución de *significado* que hacen los participantes. Los científicos sociales sí tienen que evocar esta idea, y ésta ha sido fuente de mucha controversia a partir de que Max Weber [un propulsor vigoroso de una ciencia social “libre de valores”, en el sentido de que el científico expondría lo que el actor *podría* hacer en vez de lo que *debería* hacer (Weber, 1904)] arguyó que las acciones sociales de los hombres no se podían observar y explicar en la misma manera que los fenómenos físicos (o comportamiento animal) se podían explicar y observar. La observación del científico debe necesariamente incluir interpretación en términos de su significado para los actores, y el científico social necesita una apreciación simpatizante de la situación desde el punto de vista de los actores mismos. Weber mismo, en *La Ética protestante y el espíritu del capitalismo*, proporcionó un informe del ascenso del capitalismo en términos de los cambios de valores y motivación que engendró el protestantismo calvinista. Tales informes quizá sean considerados perspicaces o absurdos, pero no son verificables: no son “conocimiento público”. Weber mismo arguyó que los valores implícitos en la atribución de significado del actor son “analizables y descubribles empíricamente como elementos de conducta humana significativa”. Su pretensión es que solamente la *validez* de dichos valores “no se puede deducir a partir de datos empíricos como esos” (Weber, 1904). Pero existe claramente una distinción importante entre, por una parte, la aceptación del científico social de la descripción propia de los participantes acerca del significado de una acción social para ellos (o el montaje de él de un argumento plausible acerca de que un significado particular está implícito en los hechos) y, por otra parte, una descripción del científico natural acerca de los hechos que cualquier otro observador puede verificar si los repite.

Una tercera característica difícil de la ciencia social que está implícita en las ya discutidas y que también contribuye a la distinción entre ella y la ciencia natural, es el problema de hacer predicciones de los hechos sociales. En parte ésta debe ser un asunto de complejidad puro, el hecho de que lo que sucede en los sistemas sociales es siempre una mezcla de efectos planeados y no planeados. Pero adicionalmente hay otros problemas. Por una razón, como es claro a partir de la observación diaria de los eventos, las pretensiones del resultado de los hechos observados en sistemas sociales quizá cambien el resultado. Los sistemas físicos no pueden reaccionar a las predicciones que sobre ellos se hacen; los sistemas sociales sí pueden. Una predicción de que la construcción de caminos mejorados que den acceso hacia y dentro de un parque nacional destruirá la belleza que los visitantes buscan, bien puede hacer que un cuerpo gubernamental introduzca un esquema de administración de tráfico para así asegurar que la belleza se preserve (e, incidentalmente, que la predicción sea falsificada). Además, más fundamentalmente, está el argumento de que las leyes (que son una forma para encarnar predicciones) no son posibles en los sistemas sociales. Que dichas leyes, que serían leyes de historia, son inexistentes, es el objetivo principal de la *Pobreza del historicismo* (1957) de Popper, y esto está resumido ingeniosamente en el prefacio de ese libro. El argumento aproximadamente es el que sigue: los hechos en los sistemas sociales son influenciados fuertemente Por el crecimiento del conocimiento humano; el crecimiento *futuro* del conocimiento, es el principio impredecible ya que no podemos conocer lo todavía-no-conocido; por ello el futuro de los sistemas sociales no se puede predecir. “ Esto significa que debemos rechazar la posibilidad de una *historia teórica*; esto es, de una ciencia social histórica que correspondería a la *física teórica*. No puede haber una teoría científica del desarrollo histórico que sirva como base para la predicción histórica”. Aparte de este argumento regido, Popper en todo el libro realmente asume la misma directriz que Nagel, en otras palabras, que *en lógica* no hay una distinción entre la ciencia natural y social, ambas con la necesidad de avanzar mediante la verificación severa de hipótesis. El hecho sigue siendo que las ciencias sociales no han efectuado el mismo tipo de progreso práctico que es tan aparente en las otras ciencias.

Todas estas distinciones cruciales entre las ciencias establecidas y las ciencias que-deberían-serlo se pueden resumir en el hecho de que en el núcleo de los fenómenos estudiados por la ciencia social está la autoconciencia de los seres humanos y la libertad de la elección que esa conciencia ocasional genera. Esta libertad irreductible deriva últimamente del hecho experimental, sobre el cual los neurofisiológicos coinciden, de que toda nuestra actividad mental (elegir, creer, etc.) está asociada con la actividad eléctrica especificada en el cerebro. Los argumentos no son fáciles de resumir (véase Thorpe, 1974, si desea una descripción más detallada, principalmente de los argumentos debidos a MacKay), pero dependen del hecho de que un observador nunca puede obtener un informe actualizado del estado mental de un agente

que está observando y que éste último acepte como correcto. Tan pronto como el agente estuviera de acuerdo sobre la veracidad del informe del observador, su acto de creencia haría que el informe fuese obsoleto al cambiar el estado del cerebro del agente. Ahora suponga que el observador fuese capaz de hacer una predicción detallada de la acción futura del agente con base en un conocimiento detallado perfectamente y milagroso del estado en que se encuentra la mente de éste último. El agente mismo haría mal en creer esa predicción *antes* de que él decida qué acción tomar (!) ya que su creencia haría obsoleto, el informe perfecto de su estado mental, sobre el cual la predicción se basa. Nada puede quitarle al agente su libertad para seleccionar la acción, y no hay un solo resultado al que él correctamente considerase como el único posible. Este tipo de argumento sugiere que como máximo, los sistemas sociales revelarán “tendencias” en vez de “leyes” y que el científico social reducirá su campo de estudio no exactamente al estudio de la realidad social, sino solamente a la lógica de las situaciones, generando hallazgos del tipo “En la situación A un resultado probable es B”, sin ninguna garantía de que esto se lleve a cabo en cualquier situación particular. Y a través de los años, con el crecimiento del conocimiento humano, la “lógica de las situaciones” (que involucrará la atribución del significado por parte de los actores) cambiará de manera gradual.

Esta discusión esperanzadoramente indica que el método de la ciencia, tan poderoso en las ciencias naturales, todavía no, fácilmente, se aplicará a la investigación de los fenómenos sociales. Un esquema de algunas de las dificultades se ha bosquejado. Éstas se describen más adelante, en el capítulo 8. Quizá valga la pena refrescar nuestra memoria aquí acerca de la riqueza espléndida de los fenómenos con los cuales una supuesta ciencia social debe enfrentar. Recordemos un pasaje de bravura de la novela de Nabokov *El ojo*, que de hecho hace referencia a muchos de los argumentos expresados aquí:

Es tonto el buscar una ley básica, e incluso más tonto el encontrarla. Un hombrecillo de espíritu mezquino decide que todo el curso de la humanidad se puede explicar en términos de signos del zodiaco muy engañosos, o como la lucha entre un estómago vacío y uno lleno: el hombrecillo contrata a un filisteo meticuloso para que actúe como el empleado de Clío, y comienza un comercio al por mayor de épocas y masas; y después desdicha para el pobre individuo, con su pobre u, dando gritos sin esperanza en medio del crecimiento denso de las causas económicas. Afortunadamente no existen dichas leyes: un dolor de muela costará una batalla, una llovizna cancela una insurrección. Todo fluye, todo depende de la probabilidad, y en vano fueron todos los esfuerzos de ese burgués adinerado con pantalones victorianos a cuadros, autor de *Das Kapital*, el fruto del insomnio y la migraña.

Problemas para la ciencia: “administración”

Si tuviésemos disponible una ciencia social en el patrón de las ciencias naturales, con hipótesis y leyes que hayan sido bien verificadas y hayan sobrevivido, y un cuerpo de teoría que cuente una historia en la cual las hipótesis y las leyes estén unidas coherente y significativamente, entonces esa ciencia social seguramente nos ayudaría en la solución de “problemas del mundo real”, justo como la ciencia natural está a disposición de los expertos en tecnología y de los ingenieros para resolver sus problemas. Ésta no *tendría* por qué evocarse, por supuesto, justo como la tecnología y la ingeniería no tienen por qué evocar a la ciencia: existen algunos ingenieros y expertos en tecnología brillantes y exitosos que actúan intuitivamente. Sin embargo, no es descabellado el anticipar que si estuviese disponible, una ciencia social establecida nos ayudaría cuando, al tomar decisiones (somos administradores), enfrentásemos problemas en los sistemas sociales. Con “problemas del mundo real” quiero decir problemas de decisión, en los sistemas sociales, que *surgen*, que enfrentamos, en contraste con el problema de un científico en un laboratorio ;problema que él puede definir y limitar. El científico selecciona el problema más difícil que de acuerdo con su oficio ofrece una probabilidad razonable de solución; la vida real nos echa encima sus problemas. Los problemas del mundo real son del tipo: ¿qué debe hacer el gobierno británico con respecto del proyecto de aviación supersónica para pasajeros, el Concorde? ¿Cómo debemos diseñar nuestras escuelas? ¿Debo casarme con esta chica? ¿Debo cambiar de carrera? Dichos problemas son de hecho problemas de administración, vagamente definidos. El proceso de administración, no interpretado en un sentido de clase, tiene que ver con la decisión de hacer algo o no hacerlo, con la planeación, con la evaluación de alternativas, con el monitoreo del

desempeño, con la colaboración de otras personas o el logro de fines mediante otras personas; es el proceso de la toma de decisiones en los sistemas sociales, frente a problemas que quizá no sean autogenerados.

Al ser esto así, podemos esperar que la llamada "ciencia de la administración" sea de hecho un cuerpo de conocimientos y principios científicos pertinentes al proceso de administración. La ciencia de la administración ciertamente existe en el sentido de que existen profesionales que se considerarían a sí mismos como "científicos de la administración", e instituciones a las cuales ellos pertenecen; hay libros, periódicos y conferencias dedicadas a la ciencia de la administración así como cursos y clasificaciones. De lo que en forma notable se carece es de un gran sentimiento, por parte de la gente que aparentemente podría obtener más ayuda de dicha ciencia, de que ésta realmente pueda ayudarles. Los administradores en la industria y en el sector público, los líderes de sindicatos, y de dependientes de tiendas, los políticos, y los organizadores, no se han convencido de que mediante los frutos de la ciencia de la administración, ésta es más que marginalmente importante para sus tareas. La mayoría de ellos estarían de acuerdo con Drucker (1974) en que "la administración es una práctica más que una ciencia. No es conocimiento, sino desempeño". Los científicos de la administración aceptan que esta visión prevalece. Cuando la Operational Research Society (sociedad de investigación operacional) sostuvo una celebración pública para conmemorar los 30 años de Investigación Operacional (OR), el *Financial Times* dijo "la tónica fue de desilusión", y el presidente de la sociedad comentó: "perspicaz FT" (Beer, 1970).

La falla del enfoque científico para realizar mucho progreso, en este punto, en su aplicación a los procesos de administración se puede examinar útilmente si miramos brevemente el ejemplo de la investigación operacional, que es el caso en que la ciencia de la administración se acerca más a tener un núcleo científico rígido. Todas las definiciones de OR enfatizan su naturaleza científica, y por supuesto, sus orígenes se basan con mucho en la adición de científicos profesionales a grupos de guerra responsables de operaciones militares (véase McCloskey y Trefethen, 1954, para un informe de los orígenes de OR, con contribuciones de algunos pioneros; también Morse, 1970). Blackett en un documento escrito en 1941 para informar al Ministerio de Marina acerca de los desarrollos que habían sucedido en la RAF, describió el objetivo de tener científicos en contacto estrecho con las operaciones: los personales operacionales dieron a los científicos la perspectiva operacional y los datos, los científicos aplicaron métodos científicos de análisis a estos datos y así fuimos capaces de ofrecer consejo útil (Blackett, 1962). Estos elementos han sobrevivido a la transferencia de la OR a actividades no militares, y la definición oficial de la Sociedad OR dice (las cursivas son mías):

La investigación operacional es la aplicación de los métodos de la *ciencia* a problemas complejos que surgen durante la dirección y administración de grandes sistemas de hombres, máquinas, materiales, y dinero en la industria, los negocios, el gobierno, y la defensa. *El enfoque distintivo consiste en desarrollar un modelo científico del sistema*, incorporando mediciones de factores como probabilidad y riesgo, con los cuales predecir y comparar los resultados de decisiones alternativas, estrategias o controles. El propósito es ayudar a la administración para que determine su política y acciones *científicamente*.

Esta declaración expresa bien la solución brillante que la OR ha adoptado ante el difícil problema de la aplicación de métodos de ciencia a partes del mundo real, en contraposición a las situaciones artificiales creadas en el laboratorio. Los ingenieros usan la misma solución: no llevan a cabo "experimentos" sobre el objeto de mundo real a estudiarse (que generalmente no está disponible). Los lleva a cabo sobre un modelo de éste, de ser posible un modelo cuantitativo. La estrategia de la OR consiste en construir un modelo del proceso en cuestión, uno en el cual el desempeño global se exprese en alguna medida explícita de desempeño (a menudo económica) después en mejorar u optimizar el modelo en términos del criterio de desempeño elegido, finalmente el transferir la solución derivada del modelo hacia la situación del mundo real. Éste es un intento heroico por ser científico en el mundo real (en contraposición al laboratorio) y las dificultades son grandes. La estrategia obviamente no se debe presionar a menos que se pueda demostrar que el modelo es válido. En el caso de un proceso de producción bien definido esto quizá no sea muy difícil; si el modelo, cuando se alimenta con la demanda del año pasado, puede generar el resultado del año pasado, entonces podemos sentirnos bastante seguros que éste refleja la realidad. Pero los ejemplos tan definidos y claros como éste son extremadamente raros. E igualmente obvio, ningún criterio de desempeño individual puede

posiblemente unir dentro de sí las consideraciones innumerables que realmente afectan las decisiones en un sistema social. Así lo que la OR puede proporcionar es una contribución crucial para una decisión de administración, una historia racional de la forma: “si usted adopta x como medida de desempeño, entonces usted quizá optimice con respecto a x si sigue las acciones siguientes...”, pero esto difícilmente puede generar el tipo de decisión irracional que, en una situación de administración, a menudo resulta ser una buena.

Lo que ha sucedido históricamente es que la OR ha concentrado la mayoría de sus esfuerzos por refinar sus herramientas cualitativas y desarrollarlas para situaciones específicas. El argumento implícito en el desarrollo de la OR en los últimos treinta años es que *las situaciones problemáticas se repiten*. Una vez que la *forma* del problema ha sido idealizada, entonces los algoritmos para su solución se pueden resolver y definir. Por ello vemos que la mayoría de los textos de la OR dedican capítulos sucesivos a los tipos de problema que se cree se repiten (por ejemplo, Churchman *et al*, 1957). Esta perspectiva la expresa Wild (1972) como sigue, en un libro acerca de la administración de los medios de producción:

...aunque los problemas tienden a diferir en la práctica, esta diferencia a menudo deriva más de los detalles de su contenido que de sus formas... se admite generalmente que las formas de problema siguientes existen:

- Problemas de distribución.
- Problemas de inventario.
- Problemas de reemplazo.
- Problemas de colas (o líneas de espera).
- Problemas de secuencia y ruta.
- Problemas de investigación (por ejemplo, relacionados con locación).
- Problemas de competitividad o de remate.

Pero es un hecho en la vida real que “el problema” se percibe generalmente como tal debido a los detalles de contenido que lo hacen único mas que por la, forma que lo hace general. Ésta es probablemente la explicación del desacuerdo intelectual que existe entre los administradores practicantes y los científicos de la administración; e indica el problema formidable que aun encaran tanto la OR como la ciencia de la administración como un todo, cuando tratan de extender la aplicación del método de la ciencia a áreas de complejidad extremas.

Los tres problemas para la ciencia explicados anteriormente (complejidad en general, la extensión de la ciencia para cubrir fenómenos sociales, y la aplicación de metodología científica en situaciones del mundo real) aún no se han resuelto satisfactoriamente, aunque algún progreso se haya hecho. De haber sido resueltos, es poco probable que la Inteligencia de sistemas y el movimiento de sistemas que unen a pensadores de sistemas en muchos campos distintos, existiesen en su forma presente. Esto no quiere decir que el pensamiento de sistemas haya hecho un progreso espectacular -en verdad, globalmente los resultados sustantivos a partir del movimiento de sistemas aún son pobres-, pero la existencia del movimiento en sí es una respuesta a la inhabilidad de la ciencia reduccionista por enfrentarse con algunas formas de la complejidad. El pensamiento de sistemas es un intento, dentro de la amplia envergadura de la ciencia, por retener mucho de esa tradición, suplementándola al enfrentarse a problemas de complejidad irreductible vía una forma de inteligencia basada en “todos” y en sus propiedades que complementan el reduccionismo científico.

Pensamiento de sistemas: emergencia y jerarquía

“Pensamiento de sistemas” no es todavía una frase de uso general. Eventualmente creo yo, se considerará al pensamiento de sistemas y al pensamiento analítico como los componentes gemelos del pensamiento científico, pero este estadio de nuestra historia intelectual aún no se ha alcanzado. Ahora es necesario establecer si enlatamos los atributos de la frase. Ésta y la siguiente sección argumentarán que el pensamiento de sistemas se fundamenta sobre dos pares de ideas, es decir *emergencia y jerarquía*, y *comunicación y control*.

Al discutirse el problema que la complejidad presenta al método de la ciencia, la controversia referente al vitalismo, primero en química orgánica y después en la biología, fue notoria. La biología es una ciencia “no restringida”, en el sentido de Pantin, y sus fenómenos son de una complejidad que ha verificado severamente al método científico. Los biólogos, de hecho han estado entre los pioneros que establecieron formas de pensamiento en términos de todos, y fue un biólogo, Ludwig von Bertalanffy, quien sugirió generalizar este pensamiento para hacer

referencia a cualquier tipo de entero, y no solamente a los sistemas biológicos. La segunda vertiente en el pensamiento de sistemas proviene de una fuente muy diferente: de ingenieros de control, comunicación, y electricidad. Un número de otros grupos también han hecho contribuciones, y podemos rastrear el desarrollo de ideas de sistemas en, por ejemplo, la psicología, antropología y lingüística. Pero las cuatro ideas principales han emergido más claramente en la biología y en la ingeniería de control y comunicación, y yo habré de presentarlas en el contexto de trabajo dentro de aquellas áreas.

Aristóteles arguyó que el todo era algo más que la suma de sus partes, pero cuando la cosmovisión de Aristóteles fue derrotada por la revolución científica del siglo XVII, ésta pareció una doctrina innecesaria. La física de Newton proporcionó una visión mecánica del universo que sobrevivió a verificaciones severas, y la perspectiva teleológica de Aristóteles, en la cual los objetos en el mundo desempeñaban su propósito o naturaleza inherente, al parecer se corrompió por especulación metafísica completamente innecesaria. Sin embargo, la historia de la biología moderna es la historia del restablecimiento del propósito como un concepto intelectual respetable. El restablecimiento no es, sin embargo, exactamente un restablecimiento del concepto *teleología*, la doctrina en que las estructuras y el comportamiento se ven determinados por los propósitos que ellos cumplen. Los biólogos tratan sobre todo de no ofrecer el cumplimiento de un propósito como *explicación causal* del desempeño biológico. Por el contrario la rehabilitación consiste en lo que Medawar y Medawar (1977) describen como "un gentilismo" derivado de la teleología, es decir, la *teleonomía*. Esta última palabra no tiene ninguna de las connotaciones metafísicas de la teleología. El desempeño descrito como si cumpliera un propósito es "teleonómico". Ahora, hacer esta distinción entre las dos palabras no es simplemente una pedantería académica. En la biología, durante este siglo, ha habido un debate a menudo truculento acerca de la naturaleza de un organismo. Este debate ha sido una versión de un debate más amplio entre el reduccionismo y el holismo. Los términos de este debate han cambiado, y el cambio anuncia la emergencia del pensamiento de sistemas.

Del lado reduccionista del argumento ha estado la postura mecanicista, para la cual los sistemas vivos son simplemente máquinas complejas. Inicialmente, los vitalistas asumieron el lado holístico del argumento, por ejemplo Hans Driesch. Para Driesch y los otros vitalistas, el desarrollo de un organismo entero a partir de un huevo sencillo debe indicar que en cada organismo en desarrollo reside una misteriosa entelequia parecida a un espíritu que, de alguna manera dirige y controla el crecimiento del todo. Los mecanicistas justificablemente desdeñaron la instancia no científica adoptada por los vitalistas -de ahí la preferencia moderna por la teleonomía en vez de la teleología- pero poco a poco el lado holístico del argumento cambió. Gradualmente el argumento estructuró que el oponerse al reduccionismo no significaba la adherencia al vitalismo. El antiguo argumento del mecanicismo -versus- el vitalismo ahora está muerto, incluso aunque algunos escritores al parecer aun siguen creyendo que el rechazar el reduccionismo quiere decir adherirse al vitalismo; véase, por ejemplo, Beck (1957) y Bunge (1973). Pero ningún científico experimental profesional negarla ahora que la evidencia indica que los sistemas vivos en todos sus mecanismos obedecen las leyes establecidas de la física y química. Ningún científico profesional evoca seriamente a la *entelequia*. Pero esto no quiere decir que el reduccionismo haya triunfado; no quiere decir que los fenómenos biológicos no sean *más que* física y química. La biología está ahora establecida como una ciencia autónoma que no se puede reducir a la química ni física. Al establecerse esto se ha establecido el pensamiento de sistemas.

La ciencia moderna de la biología emergió a partir de la visión aristotélica de que las cosas vivientes (e incluso, para Aristóteles, los objetos inanimados también) funcionaban para cumplir su propósito inherente. Un acto decisivo que hizo potencialmente de la biología una ciencia moderna fue el cálculo de Harvey. En su cálculo, Harvey estableció que el corazón debía ser una bomba que continuamente hiciera circular una cantidad limitada de sangre, como se describió en el capítulo anterior. El trabajo de Harvey dio comienzo así al debate de si los organismos vivos eran máquinas complejas o entidades imbuidas con una fuerza vital especial. Él mismo aparece en ambos bandos del argumento, creyendo que el corazón era una bomba y que residía en la sangre "el principio vital mismo" (Beck, 1957). El debate ha continuado desde el siglo XVII; su forma presente se encarna en la discusión de la pregunta: ¿la biología es una ciencia autónoma o es en principio reducible a la física y química?

Los avances prácticos en la ciencia de las cosas vivientes se aceleraron con la invención del microscopio. El examen microscópico de las plantas y del tejido vivo dio a la nueva ciencia su descubrimiento principal -el descubrimiento de la célula-, el cual nos lleva a la visión moderna de que existe en las cosas vivientes una jerarquía de estructuras dentro de la secuencia:

moléculas, organelos (entidades específicas que establecen la organización de la célula), células, órganos y organismo. En esta jerarquía el organismo mismo al parecer intuitivamente marca una frontera, (organismos que tienen una identidad obvia como entidades completas) pues tiene una frontera que los separa del resto del mundo físico, incluso aunque existan transportes que atraviesen la frontera. La pregunta es si el organismo, como el último objeto de interés en la biología, hace a ésta o no autónoma. ¿O, las explicaciones físicas y químicas demolerán esta autonomía? Uno de los argumentos cruciales con que se enfrenta este reduccionismo se discutió antes, con relación a la química orgánica; esta vez el argumento es que una demostración de que todos los funcionamientos de las células y órganos se pueden explicar en términos de hechos conocidos de la física y química no justifica la existencia de los organismos como entidades a ser explicadas. Pero la fuerza de este argumento (en esencia epistemológico) no se estableció fácilmente y la disputa sigue viva.

La discusión moderna de éste comenzó a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, con la emergencia de la escuela de biología conocida como "organísmica". Los biólogos organimistas, para quienes el organismo era el objeto irreducible al cual un enfoque puramente analítico no podía justificar, a menudo se les llama como "organicistas", palabra que se aparea con la doctrina del "organicismo". Pero aquí existe confusión de la que hay que alejarse, siendo el organicismo también el uso del organismo viviente como una *analogía* o metáfora para otras entidades más grandes, por ejemplo familias, sociedades y civilizaciones (Phillips, 1970). Ésta es una metáfora que -como habré de argüir después- ha sido muy mala para la ciencia social; sin embargo, aquí el interés se centra solamente en el debate iniciado por los biólogos organimistas y por los escritos filosóficos paralelos. El debate comenzó en la segunda mitad del siglo XIX, y algunas de las primeras exposiciones tentativas de lo que más tarde se convirtió en "el pensamiento de sistemas" fueron escritas en la década de 1920: por ejemplo *La mente y su sitio en la naturaleza* de C.D. Broad, 1923; *Holismo y evolución* de J.C. Smuts, 1926; y *Principios biológicos* de J.H. Woodger, en 1929. Woodger posteriormente tradujo, y ayudó al autor a reformular *Teorías modernas del desarrollo: una introducción a la biología teórica* de L. von Bertalanffy (Floyd y Harris, 1964). Fue Bertalanffy quien a mediados de la década de 1940 revolucionó el pensamiento organísmico ("la teoría del sistema del organismo" como él la llamó) para hacerlo pensamiento interesado en los sistemas en general, y en 1954 ayudó a fundar la society for General Systems Research (sociedad para la investigación de sistemas generales), que fue inicialmente la Society for the Advancement of General System Theory (sociedad para el desarrollo de la teoría general de sistemas general) [Bertalanffy, 1972].

Debido a que algunos biólogos organimistas, por ejemplo Driesch, también eran vitalistas, el argumento entre el reduccionismo y el holismo estuvo por muchos años mezclado con el argumento entre la explicación mecanicista de las propiedades vivientes y el vitalismo. Pero los biólogos que ahora pueden considerarse como los primeros pensadores de sistemas estuvieron ansiosos por disociarse del vitalismo, ya que éste no es un concepto científico: en los términos del argumento desarrollado en el capítulo 2, no es científico porque no pide ninguna respuesta de la naturaleza que se pueda examinar experimentalmente, es una aseveración no verificable en vez de una conjetura verificable. En el libro que Woodger tradujo a principios de la década de 1930, Bertalanffy quería demostrar que la característica distintiva de las cosas vivas al parecer era su grado de organización (las cursivas son mías):

La característica esencial del fenómeno vital que todavía no ha recibido atención suficiente es la del proceso del metabolismo... etc. sucede exclusivamente en relación con objetos materiales bien individualizados con una organización definida. Esta organización del proceso es la única característica distintiva y decisiva más clara entre los hechos vitales y los procesos ordinarios psicoquímicos (Gray y Rizzo, 1973).

Es el concepto de complejidad organizada el que se volvió la materia sustantiva de la nueva disciplina "sistemas"; y el modelo general de complejidad organizada asume que existe una jerarquía de niveles de organización, cada uno más complejo que el que está debajo. Un nivel se caracteriza por las propiedades emergentes que no existen en el nivel inferior. Aun más, a parte del hecho de que ellas "no existen" en el nivel inferior, las propiedades emergentes no tienen *significado* en el lenguaje adecuado para el nivel inferior. "La forma de una manzana", aunque es el resultado de procesos que operan en el nivel de las células, organelos, y moléculas orgánicas que componen árboles de manzanas, y aunque, esperamos, explicable eventualmente en términos de esos procesos, *no tiene significado* en los niveles inferiores de descripción. Los procesos en esos niveles finalmente dan un resultado que anuncia la existencia

de un nuevo nivel estable de complejidad -el de toda la manzana en sí- que tiene propiedades emergentes, siendo una de ellas la forma de la manzana.

La expresión filosófica clásica de la teoría de emergencia, es la de Broad (1923). (Si desea un reporte moderno convincente, véase Wartofsky, 1968, capítulo 13.) Broad describe tres perspectivas: lo que él denomina el “Vitalismo sustancial” de Driesch *et al*; “El mecanicismo biológico”, la visión de que las cosas vivas son meramente máquinas; y lo que él intitula “Vitalismo emergente” lo que ahora se refiere más comúnmente como “emergencia” o “emergentismo”. Algunos de los argumentos ahora tienen una resonancia fantástica; por ejemplo el argumento de que una razón de emergencia es superior al mecanicismo pues donde la última requiere la existencia de Dios como disecador de la naturaleza, la primera no *requiere* esto pero es compatible con ello ¡si se prueba que Dios existe! Sin embargo, el libro es extremadamente importante ya que libera al concepto de emergencia de las complicaciones del vitalismo crudo y ayuda a establecer la postura moderna de que mientras que una elaboración (reduccionista) de los mecanismos en el nivel psicoquímico es extremadamente útil, el hecho es que la existencia de organismos que tienen propiedades como todo requiere niveles diferentes de descripción que correspondan a diferentes niveles de realidad. Esto es así incluso si las propiedades de partes, junto con las leyes de combinación, pueden explicar el mecanicismo del todo. El punto es, el todo estuvo ahí para ser explicado en primer lugar. En una oración, podemos expresar la postura de Broad (que es importante para toda la discusión subsecuente del asunto) de manera breve, como sigue: “No es posible ni una epistemología de un solo nivel ni una ontología de un solo nivel”. Smuts, en 1926, abordó mucho de la misma materia, estuvo ansioso por eliminar conceptos metafísicos como *entelequia* o *élan vital* mediante el concepto de complejidad organizada, que es lo que él quiere decir con “holismo”:

Cada organismo, cada planta o animal, es un todo con una cierta organización interna y una medida de autodirección. No solamente las plantas y animales son todos, sino que en cierto sentido limitado las colocaciones naturales de materia en el universo también son todos; los átomos, moléculas y compuestos químicos son todos limitados.... Un todo es una síntesis o unidad de partes, tan estrecha que afecta las actividades e interacciones de esas partes.... Las partes no se pierden ni se destruyen en la nueva estructura... sus funciones independientes y actividades independientes se agrupan, relacionan, correlacionan y unifican en el todo estructural.

Dado el estado del conocimiento biológico en la década de 1920, Smuts no fue capaz de dar un informe de los mecanismos por los cuales el organismo se convierte en una entidad, y cuando él dice que “el holismo es la fuerza directora inherente detrás del progreso (evolucionario)”, un soplo de la metafísica se introduce en el argumento. Sin embargo, el libro es importante si consideramos que fue escrito por un político profesional. Smuts nos dice que al perder una campaña, tuvo tiempo para ¡escribir el libro! Más profesionales son los *Principios biológicos* (1929) de Woodger, quien buscó el re-pensamiento riguroso de la base intelectual de la ciencia biológica. La parte 11 del libro examina qué es una explicación en biología. Esto lleva a Woodger a considerar la antítesis entre el vitalismo y el mecanicismo, y él también se enfoca hacia la importancia del concepto de organización, ordenando argumentos de estudios celulares que demuestran que “la organización arriba del nivel químico es de gran importancia en la biología”. Esto conduce a una identificación de que la arquitectura de la complejidad es del tipo de la organización jerárquica Y que los niveles de complejidad son fundamentales para cualquier informe acerca del organismo. Aún más (las cursivas son mías):

... a partir de lo que se ha dicho acerca de la organización, parece perfectamente claro que una entidad que tenga el tipo de organización jerárquica como la que encontramos en el organismo requiere de investigación en todos los niveles, y la investigación de un nivel no puede remplazar la necesidad de investigaciones de niveles más altos en la jerarquía... un fisiólogo que desee estudiar la fisiología del sistema nervioso debe tener un nivel de organización arriba del nivel de la célula para comenzar. Debe tener al menos los elementos necesarios para constituir un arco de reflejo, y en la práctica verdadera él debe utilizar conceptos adecuados para ese nivel que no sean conceptos de la física y la química.

Él concluye que el vitalismo no es la única alternativa a las explicaciones mecánicas, y que son posibles verdaderas explicaciones biológicas, que dependan de la existencia de

jerarquías de niveles de organización en los organismos vivos. La organización jerárquica, y las propiedades emergentes de un nivel dado de organización van en consonancia con un proceso de evolución que es *creativo*.

Los escritos de Broad, Smuts y Woodger ilustran (más que constituir en sí) la emergencia de un nuevo modo de pensamiento al cual nosotros denominamos *pensamiento de sistemas*. Se pudieron haber seleccionado otros ejemplos. Filosóficamente, el trabajo de Bradley (1893), o la difícil “filosofía de proceso” de Whitehead, que argumenta en contra de la validez de una predicación con sentido común para describir la realidad, representan el mismo movimiento. (*Proceso y realidad*, 1929; Sherburne, 1966, proporciona un exégesis accesible.) Entre los otros biólogos que escribían en esta misma vena en las primeras décadas del siglo XX estuvieron J.S. Haldane y C. Lloyd Morgan, el bioquímico L.J. Henderson, quien posteriormente optó por enseñar una sociología basada en analogías fisiológicas (Lilienfeld, 1978), y W. Cannon, cuya *Sabiduría de cuerpo* tan citada, (1932) describe el mecanismo “homeostático” o autorregulador por el cual el organismo animal puede mantener constantes propiedades como los niveles de azúcar en la sangre, oxígeno, temperatura del cuerpo, etcétera.

Esta vertiente de pensamiento holístico en la biología, que comenzó en la segunda mitad del siglo XIX ha continuado por todo el siglo XX. Su forma moderna asume aún la discusión de la autonomía de la biología, y existe una literatura común continua sobre esto (véase, por ejemplo, Smith, 1966, Elsasser, 1966; Polanyi, 1968; Koestler y Smythies, 1969; Breck y Yourgrau, 1972; Bunge, 1973; Grene, 1974; Ayala y Dobzhansky, 1974; Colodny, 1977; Thorpe, 1978).

Una muestra del debate moderno, que elegantemente resume la postura antirreduccionista la proporciona Grene (1974). Ella señala que en principio una ontología de un solo nivel -la creencia, por ejemplo, de que al incrementarse el conocimiento toda la ciencia se convertirá en un informe del mundo en el lenguaje de, por así decir, sucesos atómicos- se contradice a sí misma. Esto es así porque tal creencia, para que sea significativa, requiere una ontología que admita ambos, los sucesos atómicos y la cognición. Aquí de inmediato ¡un segundo nivel se introduce de contrabando! Por supuesto, es lógicamente posible, que quizá no haya niveles entre los niveles de los sucesos atómicos y la cognición (esa en esencia es la postura de Descartes) pero las ciencias de la química y la biología consisten de algunas conjeturas bien verificadas de forma que hay tales niveles intermedios representados por moléculas, células, organelos, órganos, y organismos. Que existe una disputa viva lo ilustra el debate contemporáneo en la biología molecular. El mayor triunfo de la biología molecular es su dilucidación del proceso por el cual el DNA se duplica en una división de célula, proporcionando así un informe molecular detallado del proceso por el cual la descendencia adquiere características heredadas de sus padres. Ahora sabemos que la transmisión de una característica particular a una nueva célula, por ejemplo ojos azules o cabello negro, es el resultado de la duplicación de una secuencia particular de bases orgánicas a lo largo de la cadena molecular de ácido desoxirribonucleico (DNA). Éste es el ahora famoso “código genético”. Uno de los descubridores de la estructura del DNA, y por ello de un mecanismo posible para la operación del código, Francis Crick (1966), adopta crudamente en *Moléculas y hombres* una postura reduccionista. “El último objetivo del movimiento moderno en la biología”, él declara, “es de hecho explicar toda la biología en términos de la física y la química”. Lo que él no descubre, como señala Grene (y también Polanyi, 1968), es que *cualquier* disposición de las bases orgánicas es compatible con las leyes de la física y la química. Pero, en términos biológicos, la disposición verdadera es *crucial*: ciertas secuencias constituyen “un código”. El investigador, incluso si se trata del mismo Crick, al identificar un código, está, aceptando que “toda la biología”, no se puede, en principio, explicar como física y química. El código es una propiedad emergente en el nivel de la complejidad representado por los fenómenos biológicos.

La idea de que la arquitectura de la complejidad es jerárquica y de que lenguajes diferentes de descripción son necesarios en niveles diferentes en los años recientes han derivado en un interés creciente por la teoría de la jerarquía como tal, aunque mucho del interés aun se centra sobre la jerarquía de lógica, de la célula a las especies (Simon, 1962; Pattee, 1968-72, 1973; Whyte, *et al*, 1969; Mesarovic *et al*, 1970; Anderson, 1972; Milsom, 1972). Simon señala que el tiempo requerido para la evolución de una forma compleja a partir de elementos individuales depende críticamente de los números y distribución de las formas intermedias que son en sí mismas estables. El análisis matemático simple de las probabilidades demuestra que el tiempo requerido para que un sistema complejo evolucione se reduce mucho si el sistema está en sí mismo compuesto de una o más capas de subsistemas componentes estables. Si planteamos el argumento al revés: la edad del planeta tierra es tal que solamente las entidades organizadas

jerárquicamente ¡han tenido tiempo de evolucionar! La estructura del mundo que habitamos solamente podría ser jerárquica.

La teoría de la jerarquía se ocupa de las diferencias fundamentales entre un nivel de complejidad y otro. Su objetivo último debe ser el proporcionar ambos, un informe de las relaciones entre niveles diferentes y un informe sobre cómo se formaron las jerarquías observadas: ¿qué genera los niveles, qué los separa, qué los une? Dicha teoría todavía está en su niñez (véase Pattee, 1973, si desea la mejor discusión de lo que se requiere de ella) pero cualquiera que sea la forma que eventualmente tome, probablemente se construya sobre el hecho que las propiedades emergentes asociadas con un grupo de elementos en un nivel dentro de una jerarquía están asociadas con lo que podríamos considerar como *restricciones* sobre el grado de libertad de los elementos. Las propiedades emergentes, resultado de la aplicación de las restricciones, generarán un lenguaje descriptivo en un nivel-meta igual al nivel en que se describa a los elementos en sí mismos. Así, en el lenguaje de la química, cualquier disposición de las bases en el DNA obedece las leyes de la química física. Pero son las restricciones sobre la química ordinaria de las secuencias-base lo que produce la propiedad específicamente biológica de la codificación genética, una propiedad emergente que marca una transición del nivel que llamamos “química” al que denominamos “biología”. Esta imposición de restricciones sobre la actividad en un nivel que lleva las riendas de las leyes en ese nivel para que generen actividad significativa en un nivel más alto, es un ejemplo de acción regulatoria o de control. Las jerarquías se caracterizan por procesos de operación de control en las interfaces entre niveles.

Esto nos lleva al segundo par de ideas raíz en el pensamiento de sistemas. A la emergencia y jerarquía debemos agregar *comunicación y control*. Éstas se discutirán en la sección siguiente. Finalizo esta sección con una cita de un biólogo contemporáneo distinguido, Francois Jacob, que elegantemente resume la imagen de la emergencia y jerarquía que la biología ha construido. Los escritores que abordan el tema de sistemas a menudo han sentido la necesidad de inventar una nueva palabra para las entidades que son todos en un nivel de la jerarquía y son simultáneamente partes de entidades de nivel superior. Gerard (1964) habla de *orgs*, Koestler (1967,1978) de *holons*. Jacob (1974) utiliza el concepto del *integron*:

... la biología ha demostrado que no hay una entidad metafísica oculta detrás de la palabra “vida”... De las partículas al hombre, existe una serie completa de integraciones, de niveles, de discontinuidades.... La investigación de moléculas y organelos celulares se ha vuelto ahora el interés de los físicos... Esto no quiere decir para nada que la biología se haya convertido en un anexo de la física, que representa, como lo fue, una rama hija interesada en sistemas complejos. En cada nivel de organización, las novedades aparecen tanto en las propiedades como en la lógica. La reproducción no está dentro del poder de cualquier molécula individual por sí misma. Esta facultad aparece solamente en el integron más simple que merezca que se le denomine como un organismo vivo, esto es, la célula. Pero de ahí en adelante las reglas del juego cambian. En el integron de nivel superior, la población de células, la selección natural impone nuevas restricciones y ofrece nuevas posibilidades. De esta manera, y sin dejar de obedecer los principios que gobiernan a los sistemas inanimados, los sistemas vivientes se ven sujetos a fenómenos que no tienen significado en el nivel inferior. La biología no se puede reducir a la física, ni tampoco puede existir sin ella. Cada objeto que la biología estudia es un sistema de sistemas. Al ser parte de un sistema mismo de orden superior, a veces obedece reglas que no se pueden deducir simplemente al analizarlo. Esto significa que cada nivel de organización debe ser considerado con referencia a los niveles adyacentes.... En cada nivel de integración, algunas características nuevas aparecen... Muy a menudo conceptos y técnicas que se aplican en un nivel no funcionan ni arriba ni abajo de éste. Los distintos niveles de organización biológica están unidos por la lógica propia de la reproducción. Se les distingue por medio de la comunicación, los circuitos reguladores y la lógica interna propia de cada sistema.

Pensamiento de sistemas: comunicación y control

Al considerar al organismo vivo como un todo, como un sistema. y no como un simple grupo de componentes juntos con relaciones entre los componentes, von Bertalanffy atrajo la atención

hacia la distinción importante entre los sistemas que están *abiertos* a sus medios y aquellos que están *cerrados*. Él definió un sistema abierto (1940) como aquel que importa y exporta material. Más generalmente, entre un sistema abierto y su medio debe existir intercambio de materiales, energía e información. Los organismos, él señaló, no son como los sistemas cerrados en los cuales componentes inmutables se establecen en un estado de equilibrio; los organismos pueden alcanzar un estado firme que depende de los intercambios continuos con un medio. Lo que es más, el estado firme puede ser termodinámicamente diferente, creando y (o) manteniendo un alto grado de orden, mientras que los sistemas cerrados no tienen otro sendero para viajar sino aquel que lleva hacia el desorden en incremento (alta entropía). En una jerarquía de sistemas como la representada por la secuencia de organelo de célula a organismo, o, en general, en cualquier jerarquía de sistemas abiertos, el mantenimiento de la jerarquía generará un grupo de procesos en los cuales haya *comunicación* de información con propósitos de regulación o *control*.

Esto se refleja en el lenguaje empleado en discusiones de biología molecular moderna. Se hace referencia al DNA como “almacenamiento” y “codificación” de información (y una gran parte de él, en los 46 cromosomas de cada hombre, de acuerdo con Pratt, 1962, hay instrucciones que son el equivalente informacional de 46 volúmenes, cada uno conteniendo millones de palabras). Los procesos genéticos ocasionan “mensajes” químicos que llevan instrucciones para “activar” o “reprimir” reacciones futuras, y constituyen procesos de control que guían el desarrollo del organismo. De verdad, es intuitivamente obvio que una jerarquía de sistemas que son abiertos debe ocasionar procesos de comunicación y de control si es que los sistemas van a sobrevivir los golpes administrados por el medio de los sistemas. Esto es incluso más obvio si consideramos, no la jerarquía natural de los sistemas vivientes, sino a los sistemas jerárquicos hechos por el hombre, por ejemplo las máquinas y la planta industrial. El diseñador de una planta industrial en que se desee se produzca un producto químico en particular, por ejemplo, se vio obligado a convertirse en “un pensador de sistemas”. Él tiene que tomar en cuenta no solo los recipientes individuales del reactor, intercambiadores de calor, bombas, etc. que conforman la planta, sino también, en un nivel de consideración diferente, la planta como un todo cuyo desempeño global se debe controlar para fabricar el producto deseado a la velocidad, costo y pureza requerida. Él tendrá que asegurar que existan medios por los cuales se proporcione información acerca del estado del proceso y se use para iniciar acción que controle la reacción dentro de los límites predefinidos; esperanzadoramente, si se conoce la variabilidad de los materiales de inicio y los disturbios de medios posibles a los cuales el proceso estará sujeto, será posible el manipular automáticamente algunas de las llamadas variables de control de acuerdo a una estrategia de control para la planta como un todo.

Los dispositivos que incorporan controladores automáticos con base en la comunicación de información acerca del estado del sistema ya los conocían los antiguos griegos (Mayr, 1970) pero la invención de la teoría de control es relativamente reciente. Las matemáticas del regulador centrífugo de Watt (1788) para gobernar la velocidad de una máquina de vapor, el más famoso de todos los dispositivos de control, fue diseñado hacia fines del siglo XIX, pero es solamente durante los últimos cuarenta años que la ingeniería de control y la teoría de control se han establecido como, respectivamente, una actividad profesional y una disciplina académica relacionada. Sin embargo, las ideas de la teoría de control y de la ingeniería de comunicación e información han hecho contribuciones al pensamiento de sistemas no menos importantes que aquellas de la biología organizacional.

Una unión entre los mecanismos de control estudiados en los sistemas naturales y aquellos diseñados en sistemas hechos por el hombre la proporciona la parte de la teoría de sistemas que se conoce como cibernética, palabra que viene del vocablo griego que significa conductor. Platón utilizó la palabra al hacer una analogía entre un timonel pisoteando un barco y un gobernante dirigiendo el “barco del estado”, y Ampere en el siglo XIX la usó al discutir el lugar de la ciencia política en una clasificación de las ciencias. No consciente de esto, Norbert Wiener sugirió la palabra en 1947 para designar la materia sustancial de un grupo de estudios que se habían entonces estado llevando a cabo en América desde los principios de la década de 1940. Estos estudios se ocupaban de la teoría de los mensajes, y de la transmisión de mensajes con propósitos de control en muchos contextos diferentes (Wiener, 1948, 1950). Al identificar la generalidad de las nociones de comunicación y control (ya sea si, por ejemplo, en un contexto específico ellas hacían referencia a la regulación de la concentración de azúcar en la sangre, los movimientos involucrados cuando un búho atrapa a un ratón, o la manipulación de temperaturas y presiones en un reactor químico para controlar la velocidad de la formación del producto), Wiener definió la cibernética como “el campo entero de la teoría de control y comunicación, ya sea en la máquina o en el animal” (1948). Bajo este dictamen existe un rango de

interpretaciones (Pask, 1961). Para Ashby, el teórico líder en las décadas de 1950 y 1960, la cibernética encara “todas las formas de comportamientos siempre y cuando sean regulares, determinadas o reproducibles” (Ashby, 1956). El interés de Ashby no está en las manifestaciones del mundo real de todos controlables sino en la imagen abstracta matemáticamente expresable del mecanismo que yace bajo las encarnaciones verdaderas. Él diseñó las operaciones sintéticas que se pueden llevar a cabo sobre la imagen abstracta y así establecer las reglas formales para la controlabilidad. Para Ashby, la relación entre la cibernética y las máquinas verdaderas es paralela a aquella entre la geometría como un estudio abstracto y los objetos reales en un espacio tridimensional. La geometría, ya no más bajo el dominio del espacio terrestre, proporciona un marco matemático general dentro del cual los objetos terrestres se pueden tratar como casos especiales.

La cibernética es similar en su relación con la máquina verdadera. Toma como su materia sustancial el dominio de “todas las máquinas posibles”... Lo que la cibernética ofrece es el marco en el cual todas las máquinas individuales se pueden ordenar, relacionar, y entender (Ashby, 1956).

Y las “máquinas”, por supuesto, podrían ser naturales o hechas por el hombre.

El trabajo de Wiener describe bien el núcleo de las ideas que se han proporcionado al pensamiento de sistemas mediante el estudio de la “comunicación y el control”. Mucho de la década de trabajo que condujo a la publicación del libro de Wiener en 1948 fue llevado a cabo en colaboración con J. H. Bigelow y A. Rosenblueth, este último un científico médico en la Escuela Médica de Harvard, quien ha sido un colega y colaborador de W. B. Cannon, bien conocido por su trabajo sobre los procesos de control interno del cuerpo. Ambos, Wiener el matemático y Rosenblueth el científico médico sintieron que los desarrollos útiles estaban aparentemente en un desierto intelectual, entre las distintas disciplinas establecidas. A principios de la década de 1940 Wiener estaba tratando de desarrollar máquinas de cómputo para la solución de ecuaciones diferenciales parciales. Al comienzo de la guerra Wiener trabajó con Bigelow sobre el problema del mejoramiento de la exactitud en armas antiaéreas. La dificultad ahí consiste en computar automáticamente la posición probable y futura de la nave aérea, el mantener la computación actualizada cuando la nave aérea se mueva, y el programar que un cartucho detone en el punto adecuado. Por segunda vez Wiener se vio nuevamente trabajando en sistemas mecánico-eléctrico diseñados para usurpar lo que previamente se había pensado que era una función humana, en este caso la evaluación intuitiva del hombre cazador sobre la cuestión de hacia dónde apuntar en relación con una presa en movimiento. Wiener y Bigelow se dieron cuenta de la importancia y ubicuidad de lo que los ingenieros de control denominan el proceso de *retroalimentación*, es decir, la transmisión de información acerca del desempeño verdadero de cualquier máquina (en el sentido general) en un estadio temprano para así modificar su operación. (Generalmente, en retroalimentación *negativa* la modificación es tal como para reducir la diferencia entre el desempeño verdadero y el deseado, por ejemplo cuando se incremento la velocidad de una máquina de vapor ésta hace que el péndulo flotador del regulador automático reduzca el suministro de vapor y por ello disminuya la velocidad; la retroalimentación positiva induce inestabilidad al reforzar una modificación en el desempeño; por ejemplo, en la conversación entre dos personas en un cuarto concurrido, los tonos fuertes y más fuertes (la salida), se rige por el nivel de ruido general en incremento, ya que éste hace que la dificultad para que uno escuche al otro se incremento). El examen de situaciones en las cuales la retroalimentación excesiva ocasiona cacería oscilatoria acerca del desempeño deseado, condujo a Wiener y Rosenblueth a identificar la similitud esencial entre la cacería en sistemas de control mecánico o eléctrico y la condición patológica (“temblor de propósito”) en la cual el paciente, que intenta ejecutar un acto físico simple, por ejemplo recoger un lápiz, yerra y comienza a oscilar incontrolablemente. Esto hizo que se pusiera atención a la neurofisiología sobre “no solamente los procesos elementales de los nervios y sinapsis, sino también en el desempeño del sistema nervioso como un todo integrado”, sobre el tipo de descripción, de hecho que había comenzado a introducirse en la ciencia médica con el trabajo de Claude Bernard en la década de 1860 (Olmsted y Oimsted, 1952). Así empezó el interés de Wiener en el problema general del control. El trabajo con Bigelow, que abarcó la construcción de máquinas que trataron de predecir la extrapolación de curvas, también convenció a Wiener de que “los problemas de la ingeniería de control y de la ingeniería de comunicación eran inseparables”. Ambos se centraban en un problema núcleo no para el equipo mecánico o la circuitería eléctrica, sino para la noción abstracta más fundamental: la noción del mensaje y su transmisión. Ahora,

debido a que un mensaje se puede representar como una secuencia de eventos discretos o continuos en el tiempo (lo que los peritos en estadística llaman una serie de tiempo), Wiener pensó acerca de la naturaleza estadística de la transmisión del mensaje. El trabajo sobre la separación del mensaje planeado (la “señal”) y del ruido distorsionante de fondo (ambos se podrían representar durante series de tiempo) entonces condujo a una visión de la transmisión de información como si ésta fuera una transmisión de alternativas, con la unidad *cantidad de información* definida como la información transmitida bajo la forma de una decisión simple (un “sí” o “no”, un uno o un cero, un punto o un guión) entre alternativas igualmente probables. La idea de una teoría basada estadísticamente en cantidades de transmisión de información se les estaba ocurriendo simultáneamente al perito en estadística R.A.Fisher, a Wiener y a Claude Shannon, un ingeniero en comunicaciones de la Bell Telephone Laboratories. Para Wiener, la unidad esencial del grupo de problemas centrados sobre la comunicación, el control, y la estadística demandaba un nuevo nombre para el campo: él se vio “forzado a acuñar al menos una expresión artificial neogriega”. La cibernética había nacido.

A pesar del ardiente entusiasmo con el cual algunos devotos aceptan las nociones generales de la cibernética, a menudo, con el interés de aplicarlos promiscuamente en otros campos, no ha sido fácil el utilizar las formulaciones lógico-matemáticas de la cibernética para derivar proposiciones verificables en sistemas reales. Sin embargo, esto sí proporciona una Visión potencialmente nueva de muchas áreas de problemas en las cuales el reduccionismo previamente se ha tambaleado. Por ejemplo, el problema mente-cuerpo que ha obstinado a la filosofía por cientos de años, sí se le ve mediante la cibernética, al parecer está mal planteado (Bateson, 1971; Sayre, 1976). En un análisis cibernética del proceso en el cual una persona piensa, actúa, y modifica el comportamiento subsecuente bajo la luz de actos precedentes, todos estos ítems (incluyendo a los actos mismos) podían considerarse como procesamiento de información. Bateson argumenta que la unidad autocorrectiva total que hace este proceso no es, sin embargo, el ser humano; sino que es un sistema cuyas fronteras van más allá del cuerpo humano. El sistema es una red de información: senderos de transmisión entre los que se incluyen algunos externos hacia el actor; en esta visión, la mente no está simplemente asociada con el cuerpo humano sino que es inmanente en el cerebro, además del cuerpo, además del medio.

Las utilidades prácticas asociadas generalmente con la cibernética son aquellas que tienen que ver con el diseño de controladores para sistemas hechos por el hombre. Éste es, por supuesto, el campo de los ingenieros de control, y mucho del trabajo experimental en la cibernética busca la construcción de máquinas que exhiban comportamiento “inteligente”, como medio de exploración de mecanismos posibles para modelos del cerebro. El mismo Ashby, aunque es responsable de muchos de los teoremas formales sobre la materia, emprendió este trabajo debido a un interés primordial en los mecanismos biológicos, en especial aquellos por los cuales los sistemas vivientes regulan su propio comportamiento. Seguramente es verdad que la naturaleza de las ideas *control* y *comunicación*, y sus uniones con la *emergencia* y *jerarquía* son aparentemente más ricos en los sistemas biológicos.

Siguiendo los argumentos propuestos por Pattee (1973), un físico interesado en el problema del origen de la vida, nosotros podríamos imaginar el concepto control mediante la siguiente imagen de sistemas biológicos.

El universo físico es una jerarquía; en sus niveles más inferiores existen partículas nucleares, después átomos, después moléculas; tres niveles diferenciados por las fuerzas involucradas: entre las partículas nucleares hay fuerzas de alrededor de 140 millones de voltios de electrón, entre los átomos en una molécula hay fuerzas “de valencia” de alrededor de cinco voltios de electrón, entre las moléculas hay fuerzas más débiles de cerca de medio voltio de electrón. La jerarquía en este estadio se caracteriza por estos niveles de energía, y son estas diferencias las que sugieren que no es tonto el tratar a los sistemas de núcleos, átomos y moléculas como diferentes tipos de un todo. Encima del nivel molecular, algunos de los ejemplos de sistemas que consisten de grupos de moléculas interactivas, exhiben propiedades especiales que nos hacen llamarles sistemas “vivientes”. Tales sistemas se caracterizan, entre otras cosas, por exhibir procesos diferenciados que se podrían poner en acción mediante mensajes adecuados y los cuales sirven para crear y recrear, a los sistemas mismos; a largo plazo tales sistemas ledem adoptar y poner en evolución más formas variadas. Para entender estas propiedades es necesario evocar la idea del control jerárquico. El control siempre está asociado con la imposición de restricciones, y un informe de un proceso de control necesariamente requiere que nosotros tomemos en cuenta al menos dos niveles jerárquicos. En un nivel dado es posible, a menudo, el describir el nivel mediante la escritura de ecuaciones dinámicas, bajo la consideración de que una partícula es representativa de la colección, y de que las fuerzas en

otros niveles no interfieran. Pero cualquier descripción de un proceso de control ocasiona que un nivel superior imponga restricciones al inferior como, por ejemplo cuando la célula como un todo restringe las posibilidades psicoquímicas abiertas al DNA y lo transforman en “el sustentador de un código”. El nivel superior es una fuente para obtener una descripción alternativa (más simple) del nivel inferior en términos de funciones específicas que son emergentes como resultado de la imposición de restricciones. Así, algunas moléculas otrora ordinarias en una célula las restringen para que sustenten la función “represor” o “activador”: estas funciones no son propiedades químicas inherentes, son el resultado de un proceso de control jerárquico. En general, el control jerárquico requiere que se satisfagan tres condiciones. En primera la imposición de una restricción debe imponer nuevas relaciones funcionales; esto involucrará una “descripción alternativa” del nivel inferior que ignora algunas de sus dinámicas detalladas. En segunda, la imposición de una restricción -si el sistema va a ser “viviente”- debe ser opcional en el sentido de que no sea tan estricta que conduzca a la rigidez (como lo son las restricciones que gobierna la formación de cristal, por ejemplo) ni tan relajadas como para que las funciones específicas no se generalicen en el nivel inferior (en cuyo caso simplemente tenemos lo que los físicos reconocen como una “condición frontera”). En tercera, la restricción debe actuar sobre las dinámicas detalladas del nivel inferior. Para finalizar, en los sistemas vivientes, la variedad de descripciones alternativas -o funciones específicas que quizá se desarrollen, al parecer no está establecida durante un largo período de tiempo, nuevas formas y funciones podrían evolucionar. Una teoría completa del control jerárquico podría explicar exactamente cómo es que colecciones de elementos pueden espontáneamente separar funciones especiales persistentes bajo las restricciones de la colección como un todo. Como Pattee señala, tal teoría todavía no existe. Éstos son los albores en el movimiento de los sistemas.

Este breve examen de la materia sustantivo de la cibernética y de la naturaleza básica de un mecanismo de control, indica cuán cerca está la unión entre el control y la comunicación. Todos los procesos de control dependen de la comunicación, de un flujo de *información* en la forma de instrucciones o restricciones, un flujo que puede ser automático o manual. En el caso del regulador automático de la máquina de vapor, los péndulos giratorios que abren o cierran automáticamente la válvula de vapor remplazaron a un operador humano que previamente controlaba la válvula con la mano. Ambos, él y el regulador automático se podrían considerar como un receptor de información acerca de la velocidad de la máquina, receptor que “toma una decisión” (programada completamente en el caso del regulador automático) y retroalimenta “una instrucción” a la válvula. Observe que la acción del regulador automático virtualmente no tiene nada que ver con las consideraciones de energía, ya que la energía involucrada en el proceso de control se compara legiblemente con aquella de la máquina de vapor en sí. Y aún así la acción del regulador automático es crucial dentro del sistema como un todo, su poder reside simplemente en su habilidad para recibir y transmitir información. Consideraciones similares se aplican en los organismos vivientes en todos los niveles. Monod y sus colaboradores, por ejemplo, han imaginado los mecanismos de control que gobiernan la síntesis de proteína en la bacteria *Escherichia coli* (Monod, 1972). Los mecanismos de retroalimentación involucran “identificación” de “señales químicas”: una molécula represora inactiva la reproducción de proteína, pero se inactiva a su vez mediante un “inducidor”. Monod llama al fenómeno, que permite que las leyes de la química sean superadas, o escapar de ellas, maravillosamente y casi milagrosamente “telenómico”. Su explicación no se podría escribir en el lenguaje de la energética, únicamente en el lenguaje de la transmisión de información. En general, la idea de la información es anterior a la de la retroalimentación, ya que cualquier mecanismo de retroalimentación en un sistema viable consiste de un sensor capaz de detectar cambios en el medio disruptivo potencialmente y un causante de efectos (afectador) capaz de inicializar una opción de remedio. Parte del trabajo más importante de Ashby ha sido su demostración de que el control efectivo continuo en un medio cambiante requiere de un controlador con una variedad de respuesta que puede igualar la variedad de la información del medio -la denominada Ley de Variedad requisitada. Un ejemplo final de la importancia de la comunicación de información para el comportamiento de un sistema deriva del trabajo de James Miller. Él ha dedicado su carrera científica a la definición de las características de los sistemas vivientes. De acuerdo a su modelo, cualquier miembro de la clase “sistema viviente” tiene diecinueve subsistemas críticos (Miller, 1978). Al menos once de estos procesan información (algunos también procesan materia-energía): “reproductor, frontera, transductor de entrada, transductor interno, canal y red, decodificador, asociador, memoria, decididor, codificador y transductor de salida”. Incluso si este modelo no es aceptado, es difícil imaginarlo como algún reporte alternativo del proceso de la vida podría excluir el concepto de procesamiento de información.

Muchos podrían argüir, de hecho, que el concepto de información es la idea más poderosa con que hasta aquí ha contribuido el movimiento de sistemas, comparable en importancia con la idea de la energía. Ambas son abstracciones; ambas tienen poder explicativo considerable; ambas generan conjeturas que se pueden someter a la verificación de una manera experimental. La física sería una materia caótica sino contara con la idea de la energía, definida como la capacidad para hacer trabajo. El pensamiento de sistemas, similarmente, no podría existir sin la idea de la información, aunque su definición precisa genera algunos problemas que todavía no están resueltos. Es importante, para lograr un entendimiento de la naturaleza del pensamiento de sistemas, el reconocer ambas, la importancia de la información como un concepto y las severas limitaciones de la teoría de la información como existe en el presente.

Aunque el ascenso de la civilización en gran parte ha dependido de la habilidad del hombre para establecer una continuidad a largo plazo en la comunicación más allá del discurso simple de momento-a-momento, es únicamente en los últimos sesenta años que la comunicación ha sido objeto de estudio científico, y que la información haya emergido como un importante concepto científico (véase Cherry, 1957, si desea un ensayo general valioso sobre la comunicación humana) El trabajo que Wiener y Shannon hicieron independientemente a finales de la década de 1940, que ya hemos mencionado, y que estableció a la teoría de la información como una materia científica, se construyó con base en los trabajos anteriores de ingenieros de comunicación, notablemente con el trabajo de Nyquist (1924) y Hartley (1928).

La conceptualización básica en la ingeniería de sistemas de comunicación es que una fuente de información genera un “mensaje” que se codifica para producir una “señal”; esta señal se transmite a través de un “canal”, que inevitablemente introducirá algunas perturbaciones no deseadas que se denominan “ruido”; la señal más el ruido pasan entonces a un “decodificador” que regenera el mensaje original, con poca distorsión (si somos optimistas), para el receptor. Ahora es obvio que los ingenieros interesados en tales sistemas estarán interesados en la comparación de uno con otro, y de que esto requerirá de alguna manera mediante la cual se pueda medir lo que se transmite. En particular la medición de la velocidad a la cual el mensaje codificado atraviesa el canal (“capacidad del canal” como se le denomina) requerirá una medida cuantitativa de lo que se está transmitiendo, una medida cuantitativa de la “información”. Es un triunfo para la teoría de la información el que sea ella quien proporcione esta medida; la exposición clásica de esto la constituye el documento de Shannon 1945 (reimpreso en Shannon y Weaver, 1949). Sin embargo, la desventaja inherente es que lo que se mide bajo el nombre de “información” en la teoría de la información realmente tiene muy poco que ver con lo que nosotros entendemos mediante la palabra en el lenguaje de todos los días. En un uso normal, la información se obtiene mediante la atribución de significado a los datos: yo convierto los datos proporcionados mediante las posiciones de las manecillas de un reloj en la información que me dice que ya se me hizo tarde para una cita. La medida cuantitativa de “información” en la teoría de la información, no obstante, no tiene que ver para nada con el significado; la razón de esto se remonta a su origen entre los ingenieros. Los intereses de los ingenieros son la eficiencia del proceso por el cual un mensaje -cualquier mensaje- se convierte en una serial que se transmite y se recibe. No están interesados como ingenieros que son, con el contenido del mensaje, de ahí las limitaciones sobre la definición técnica de “información” en la teoría de la información estadística, que se aplica indiferentemente tanto a los mensajes significativos como a los triviales.

Dada la naturaleza del modelo general de un sistema de comunicación, e ignorando cualquier consideración del valor del mensaje para el ser humano que lo recibe, es obvio que las mediciones de desempeño de un sistema de comunicación podrían derivarse de algunos aspectos diferentes de éste. En primera, la capacidad de información de un canal de comunicación, si es mensurable como la cantidad de Información transmitida por segundo, nos diría algo muy significativo acerca del sistema. Alternativamente, al concentrarse en el código como una fuente de la señal, el contenido de información de la señal transmitida sustentará presumiblemente alguna relación definitiva con el grupo de todas las señales posibles que los símbolos de código podrían proporcionar. Finalmente, en principio debe haber una medida proporcional del grado de confianza de que el mensaje recibido sea el mismo que se transmitió y no una distorsión. De hecho las tres medidas se utilizan, y todas involucran una expresión para “contenido de información” de la misma forma matemática. Dado que mi interés aquí es únicamente el ilustrar la naturaleza de la teoría de la información, necesito solamente y con brevedad hacer referencia a una de estas medidas. (Si desea tratados más detallados sobre este tema, véase Shannon y Weaver, 1948, y muchos otros textos, por ejemplo Cherry, 1957; Rosie, 1966; Bell, 1968; ambos,

Sayre, 1976 y Chapman, 1977, proporcionan tratados cortos desarrollados para un público de “sistemas” más que para un público “ingenieril”).

Imagine que un código fuente contiene dieciséis símbolos igualmente usados. Se puede verificar fácilmente que se necesitan cuatro preguntas binarias (sí/no) para especificar (por ejemplo, para seleccionar) un símbolo de entre los dieciséis. [La primera le indica si el símbolo está entre los primeros ocho o entre los últimos ocho, el segundo si el símbolo está entre los primeros (o en los últimos) cuatro, etc.] Esto surge de la relación $2^4=16$, una ecuación que se podría re-escribir $\log_2 16 = 4$. Así parece que la naturaleza informacional de esta fuente, en otras palabras, que un símbolo requiere para su selección cuatro unidades de información (o “bits” como se les denomina) se puede expresar como $\log_2 16$. En general para un código de n símbolos igualmente parecidos la expresión será $\log_2 N$. Dado que la probabilidad de selección p para cualquiera de estos símbolos es $1/N$, ésta se podría reescribir como $-\log_2 p$. La teoría ha demostrado que en general, para los códigos que tienen cualquier número de símbolos que no tienen la misma probabilidad de ser seleccionados, la expresión todavía es de esta forma, siendo $-\sum p_i \log p_i$. Esta es la expresión para el contenido de información que se deriva para cada una de las tres medidas potenciales a que se hizo referencia anteriormente. La sugerencia de que la expresión logarítmica se utilice para medir la información la hizo Harley. La gran contribución de Shannon fue el extender la teoría para que incluya cosas como los efectos de canales ruidosos y el deducir un número de teoremas que son básicos para el diseño de sistemas de comunicación. Por ejemplo, en uno de los teoremas de Shannon se demuestra a los ingenieros de diseño que cualquier canal tiene una capacidad mínima relacionada con las restricciones de canal que el propio ingeniero no puede nunca exceder: su trabajo es, entonces, el definir un enfoque que limite tanto como sea posible.

La teoría de la información estadística es un logro considerable y espectacular, pues introduce en el dominio de la ciencia una nueva área de actividad humana. Simplemente debido a esto debemos observar más que cuidadosamente sus limitaciones y eliminar algunas de las demandas más prominentes que se le han hecho. La teoría cubre más que adecuadamente aquellos aspectos de la información que son cruciales para el ingeniero en comunicación. Al hacer esto, asume necesariamente que 1000 palabras cualquiera de prosa tienen el mismo contenido de información que cualquiera otras 1000 palabras. Las medidas de contenido de información tienen que ver únicamente con la frecuencia de inoportunidad de símbolos, y nada que ver con lo que estos simbolizan. A esto último por lo general se le llama “información semántica”, pero la teoría de la información semántica está en su niñez. Aunque Wiener trató “cantidad de información” y “cantidad de significado” como sinónimos (Bar-Hillel, 1955, discute esto), la distinción fue identificada por Shannon, quien insiste en que “estos aspectos semánticos de la comunicación no son relevantes al problema de la ingeniería” y por Weaver, cuyo escrito temprano en que discute esto fue reimprimido junto con el escrito clásico de Shannon en 1949. Weaver sugiere que:

El concepto de la información desarrollado en la teoría [de Shannon], al principio parece engorroso y bizarro -engorroso porque éste no tiene nada que ver con el significado, y bizarro porque se enfrenta no sólo con un mensaje individual sino más bien con la naturaleza estadística de un ensamble completo de mensajes...

Él define tres niveles de problema: nivel A, “el de problema técnico” de la transmisión de la señal (con el cual la teoría se enfrenta); nivel B, “el problema semántica” sobre cuán precisamente los símbolos transmiten el mensaje deseado; y nivel C, “el problema de la efectividad” sobre la manera en que el significado afecta la conducta del receptor. Él señala la naturaleza jerárquica de los niveles, pues los niveles B y C “pueden hacer uso solamente de aquellas incurrencias de señal que puedan ser posibles cuando se analicen en el” nivel A, y espera que su discusión haya “purificado el aire... listo para una verdadera teoría del significado”. Ésta ha tardado mucho en emerger, y representa un problema extremadamente difícil. Bar-Hillel y Carnap (1953) han dado un modesto paso hacia ella con base en el trabajo de Carnap sobre la probabilidad inductiva; ellos tratan de establecer una medida de la probabilidad *a priori* de afirmaciones declarativas muy simples, y por ello están interesados con el nivel B de Weaver en una instancia particularmente simple. Ackoff (1957) y Ackoff y Emery (1972), introducen el nivel C; ellos establecen una serie de definiciones y medidas tentativas relacionadas a los objetivos de un individuo que recibe información, la evaluación de sus objetivos, sus posibles cursos de acciones y las probabilidades de que él elija un curso de acción particular para perseguir un objetivo en especial. Por ejemplo, en el trabajo de 1972, ellos

definen a la información como una comunicación que produce un cambio en cualquiera de las probabilidades del receptor referentes a la selección de un curso de acción en particular, y a la motivación como una comunicación que “genera un cambio en cualquiera de los valores relativos que el receptor atribuye a los posibles resultados de selección” en un curso de acción. El problema no resuelto es hacer que tales definiciones sean operativas. El autor comenta:

Dichas aplicaciones no son fáciles. Son costosas y absorben mucho tiempo, y quizá requieran un grado de control sobre los objetos que es difícil, si no imposible, de obtener.

Sin embargo, la esperanza es que:

... la existencia de tales medidas, incluso aunque no sean prácticas o fáciles de aplicar... proporcionan un objetivo estándar de cuáles índices se deben buscar.

Es adecuado volver a decir: estos son los albores en el Movimiento de Sistemas.

La forma del movimiento de sistemas

En las dos secciones previas se ha discutido la emergencia, en diferentes áreas de estudio, de dos pares de ideas que son el núcleo del pensamiento de sistemas: emergencia y jerarquía, comunicación y control. Ellas proporcionan la base para una notación o lenguaje que se puede utilizar para describir el mundo que hay fuera de nosotros. Además, estas ideas proporcionan un bosquejo para ambas, para una descripción de sistemas del universo y para “un enfoque de sistemas” con qué enfrentar los problemas de éste, esto último siendo complementario al enfoque reduccionista encarnado en el método de las ciencias naturales. Un resumen de sistemas del mundo observado y un enfoque de sistemas para los problemas de éste se pueden encontrar en muchas disciplinas diferentes; todos estos esfuerzos juntos constituyen lo que yo quiero decir con “el movimiento de sistemas”. Es el grupo de intentos en todas las áreas de estudio por explorar las consecuencias del pensamiento holístico más que del pensamiento reduccionista. El programa del movimiento de sistemas se podría describir como la verificación de la conjetura de que estas ideas nos permitirán enfrentar el problema que el método de la ciencia encuentra tan difícil, es decir, el problema de la complejidad organizada.

Quizá haya sucedido que la exploración del pensamiento holístico se haya llevado a cabo en varias disciplinas empleando el lenguaje adecuado para cada materia diferente. Lo que de hecho ha sucedido es que los todos, en muchas áreas diferentes de estudio, desde la geografía física hasta la sociología, se han estudiado utilizándolas ideas y el lenguaje adecuado para sistemas de cualquier tipo. El que el movimiento de sistemas sea, incluso en una visión avinagrada, al menos una federación suelta de asuntos similares (unidos mediante el concepto de “sistemas”), es el logro principal de Ludwig von Bertalanffy. La contribución individual más grande para esta revolución intelectual menor de la década de 1940 (aún es muy pronto como para saber si ésta eventualmente se considere una revolución mayor) es probablemente la de Norbert Wiener. Pero fue Bertalanffy quien insistió en que las ideas emergentes en los distintos campos se podían generalizar en el pensamiento de sistemas; por ello a él se le reconoce como el fundador del movimiento. (*Festschrift* de Gray y Rizzo, 1973, proporciona una visión panorámica del trabajo de Bertalanffy y de sus intereses.) Su propio pensamiento, como reflejan sus escritos, muestra poco desarrollo a partir de la década de 1940 y hasta su muerte en 1972, y su trabajo Lilienfeld (1978) lo describe (no injustamente) como “más que repetitivo e incluso estático en carácter”. La visión inmutable de Bertalanffy, que podría describirse justamente como su visión, era que habría de ascender una teoría meta de sistemas de alto nivel, expresada matemáticamente, como resultado del trabajo en diferentes campos. Esta aspiración es clara en los documentos fundadores de lo que es ahora la Society for General Systems Research (sociedad para la investigación de sistemas generales). En la revista *Filosofía de la ciencia*, 1955, por ejemplo hay un anuncio (página 331) de que “una sociedad para el desarrollo de la teoría de sistemas generales está en proceso de organización”. Los implicados eran el biólogo

Bertalanffy, junto con un economista (K. E. Boulding), un fisiólogo (R. W. Gerard), y un matemático (A. Rapoport). El propósito era alentar el desarrollo de “sistemas teóricos que sean aplicables a más de uno de los departamentos tradicionales del conocimiento”. Los objetivos de la Teoría de Sistemas Generales (GST) iban a ser:

1. El investigar el isomorfismo de los conceptos, leyes y modelos en varios campos, y el ayudar en transferencias útiles de un campo a otro;
2. El alentar el desarrollo de modelos teóricos adecuados en áreas que carecían de ellos;
3. El eliminar la duplicación de esfuerzos teóricos en diferentes campos;
4. El promover la unidad de la ciencia mediante la mejoría de la comunicación entre los especialistas.

El logro principal de la organización, resultado de esta iniciativa, ha sido la publicación anual de documentos de gran alcance en el Anuario de Sistemas Generales (General Systems Yearbook). La teoría general vislumbrada por los fundadores no ha emergido ciertamente, y la GST en sí misma ha recibido ataques fuertes, en especial de Berlinski (1976) y Lilienfeld (1978). Al increpar a Lilienfeld por darse la molestia de atacar “un espejismo”, Naughton (1979a) sugiere que no se obtiene nada que atacar en un cuerpo coherente de conocimiento verificado, a no ser de “una mixtura de perspicacias, teoremas, tautologías y corazonadas...”.

Estas dificultades de la GST, y el tipo de tentaciones que enfrenta, se ilustran mediante un problema molesto en la teoría de la información. La forma matemática de la expresión para el contenido de Información es la misma que la que se emplea para la entropía en la mecánica estática, pero con el signo inverso. Ahora, dado que la entropía mide el grado de desorden, y que la información plausiblemente se puede considerar como algo que reduce la incertidumbre y por ello incremento el orden, resulta muy tentador el igualar la información con la entropía negativa (“negentropía”). En un pequeño libro de gran influencia, Schrödinger (1944), declaró que el organismo viviente “se alimenta de entropía negativa”, y Wiener, (1948) no dudó de que el orden que un organismo extrae de su medio es sinónimo de la información:

Justo como la cantidad de información en un sistema es una medida de su grado de organización, la entropía de un sistema es una medida de su grado de desorganización-, y la primera es simplemente el negativo de la segunda.

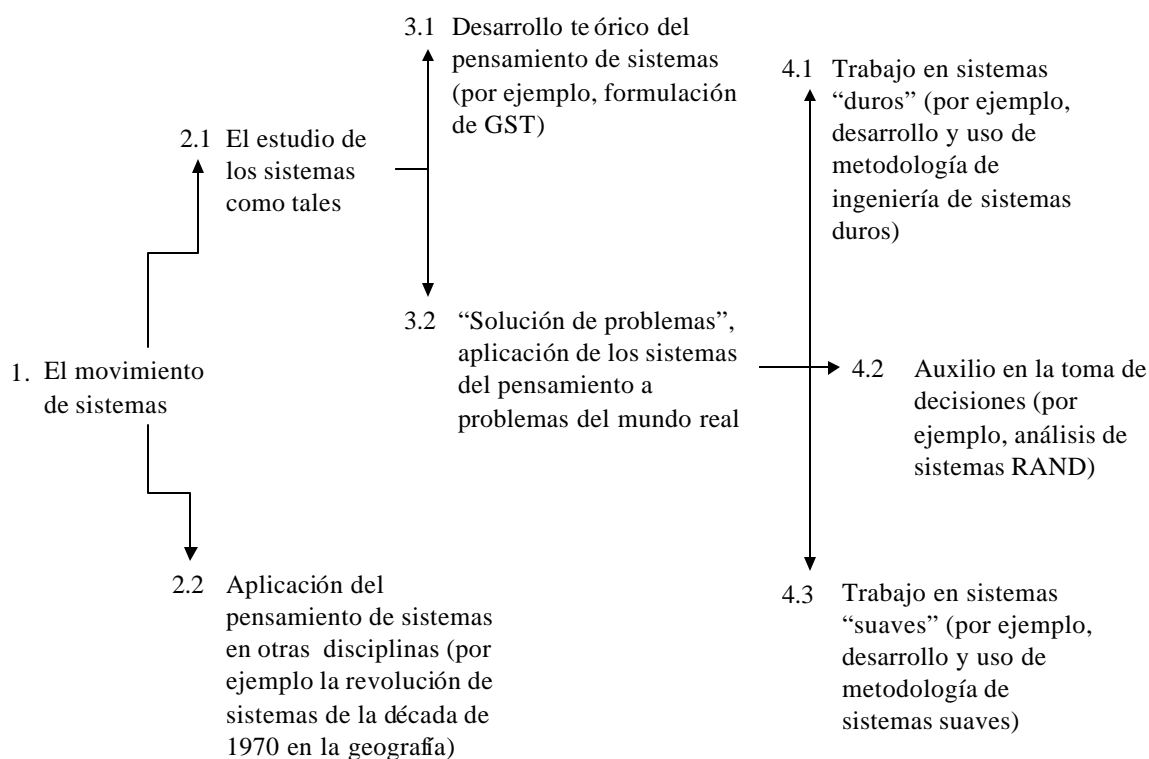
De hecho esta unión aparente entre la información y la entropía, que se asume con simpleza en mucha de la literatura, es excepcionalmente difícil de establecer con rigor (Bell, 1968, y Chapman, 1977, discuten el problema, que depende de las diferentes dimensiones de las restricciones en las dos expresiones). La similitud de forma matemática entre la información y la entropía negativa no establece ninguna conexión física que sea significativa entre los dos conceptos. Las analogías matemáticas nunca pueden establecer tales conexiones, pero la GST tiene poco contenido más allá de dichas analogías.

El problema con la GST es que proporciona generalidad a cambio de carencia de contenido. El progreso en el movimiento de sistemas probablemente provenga del uso de ideas de sistemas dentro de áreas problemáticas específicas y no del desarrollo de una teoría encubridora.

Aunque la GST en sí misma no proporciona un medio para avizorar la totalidad del trabajo que se está llevando a cabo en el movimiento de sistemas, la distinción apenas hecha - entre el desarrollo del pensamiento de sistemas como tal y la aplicación de éste dentro de otras áreas, o disciplinas- se puede extender para que genere un mapa razonable de toda la actividad del movimiento (Checkland, 1979a). Yo encuentro útil a esto ya que “coloca” cualquier parte de trabajo particular y mantiene un registro de la literatura creciente de esta disciplina-meta.

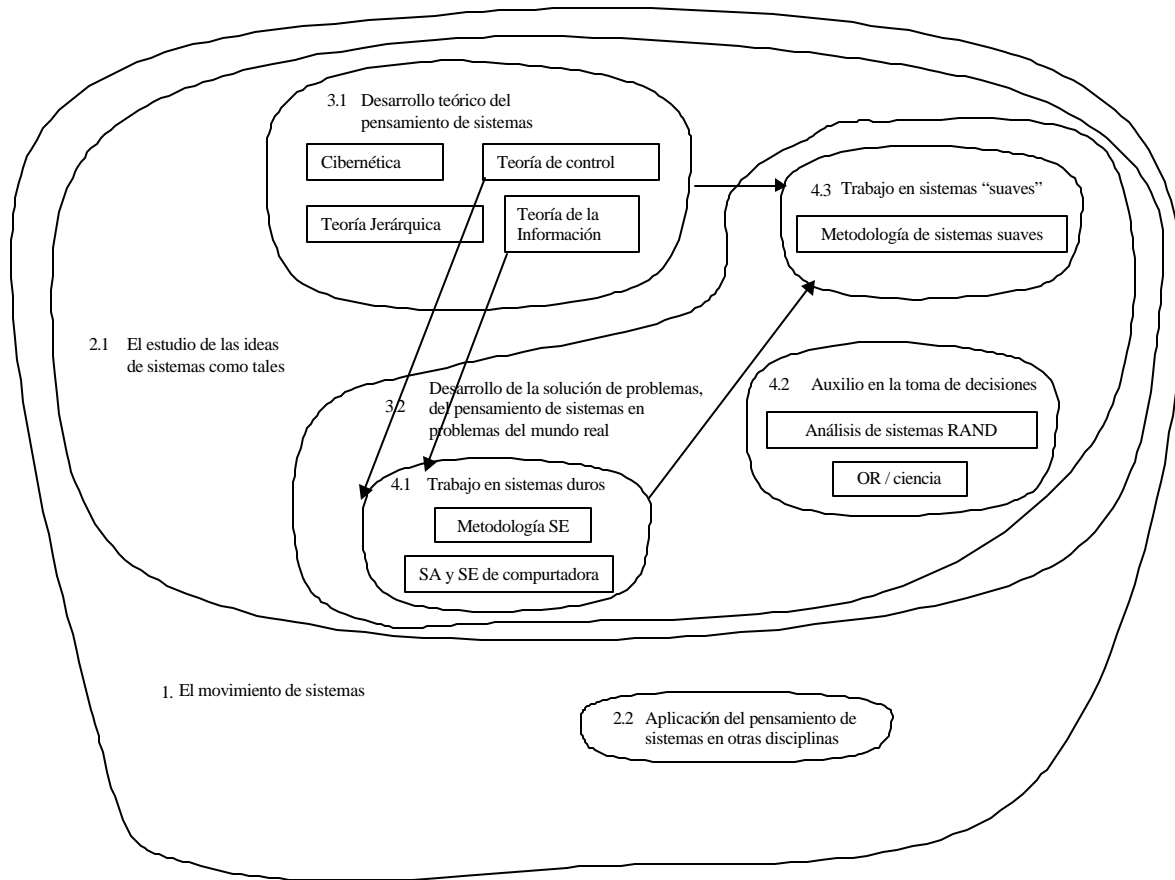
Para construir el mapa se debe hacer un número de distinciones. En primera, se debe hacer una distinción entre el desarrollo de las ideas de sistema como tales (como en, por ejemplo, la cibernética) y la aplicación de ideas de sistema dentro de una disciplina ya existente (como en el caso de los geógrafos de Cambridge, quienes reescribieron la geografía desde un punto de vista de sistemas -Chorley y Kennedy, 1971; Chapman, 1977; Bennett y Chorley, 1978)-. Esto genera dos grandes áreas de trabajo de sistemas. En segunda, sobre el trabajo del

pensamiento de sistemas como tal, distinguir entre el desarrollo de ideas de sistema puramente teórico y sus interrelaciones, y trabajar con base en la noción del desarrollo de ideas al tratar de ingenierar sistemas en el mundo real, utilizando esa palabra en su sentido amplio. La GST es un ejemplo de lo primero; el desarrollo de sistemas que ingenieren la metodología es un ejemplo de lo último. Pero la ingeniería de sistemas duros (a discutirse en el Capítulo 5) es sólo un ejemplo del desarrollo del pensamiento de sistemas mediante intentos en la solución de problemas. Hay otros ejemplos, y esto conduce a una tercera distinción: la distinción entre (a) ingenierar sistemas “duros” como tal: (b) utilizar ideas de sistemas como un auxiliar para la toma de decisiones (como en una investigación operacional); y (c) utilizar la ingeniería de sistemas para enfrentar problemas “suaves” mal estructurados (como se discutirá en los capítulos 6 y 7). Estas distinciones se muestran abajo.



Estas siete actividades dentro del movimiento de sistemas conforman la imagen de la figura 2. También se indican las influencias más importantes de un cuerpo de trabajo de sistemas sobre otro. Así, la ingeniería de sistemas duros ha sido afectada poderosamente por el desarrollo de la teoría de control y de la teoría de la información puesto en marcha por los ingenieros en comunicación. La ingeniería de sistemas en sí misma dio un ímpetu poderoso al trabajo sobre una metodología de sistemas "suaves" para problemas mal estructurados que se describen en los capítulos 6 y 7. Significativamente perdida se encuentra una flecha desde 3.1 a 4.2; en su totalidad el mundo de ciencia RAND/OR/administración no ha sido afectado por el desarrollo teórico del pensamiento de sistemas, éste ha sido sistemático más que sistémico en perspectiva, a pesar de la insistencia que se hace en el primer libro de texto de la investigación operacional referente a que "la envergadura del objetivo de OR es un ejemplo de un enfoque de sistemas" (Churchman *et al*, 1957) y su sentimiento admirable de que "la OR está interesada en casi todo lo que el sistema puede abarcar" dentro de las restricciones de tiempo y recursos.

Las influencias que se muestran son internas para el movimiento de sistemas. La figura 2 también se puede extender para que incluya las influencias más importantes de cuerpos externos del conocimiento. Esto se hace en la figura 3 que indica, por ejemplo, que las influencias más importantes sobre el análisis de sistemas RAND, OR y la ciencia administrativa, han sido los métodos de las ciencias naturales y económica (entendible dados los orígenes históricos de OR).



Cómo está construido el diagrama:

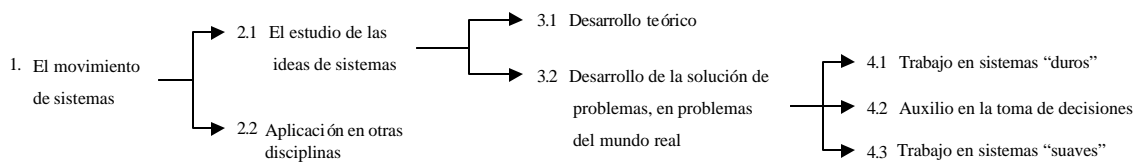


Figura 2. La forma del nacimiento de sistemas (las fechas indican las influencias más importantes).

Es importante tener bien claro cuál es el estatus de este “mapa del movimiento de sistemas”. No es, como tal, una imagen del movimiento de sistemas del mundo real: cualquier proyecto de sistemas del mundo real, muy bien puede ocupar algunas de las categorías del mapa. En sí, el mapa no es mas que un grupo de distinciones lógicas; no es incluso un grupo de distinciones que tienen que hacerse; es un grupo que yo he elegido para hacer. Lo que este grupo particular proporciona, argumento yo, es una imagen del movimiento de sistemas que se ajusta bien a la actividad de sistemas del mundo real en curso, a sus esfuerzos intelectuales y su literatura, y que también permite que cualquier ejemplo particular de trabajo o de literatura se coloque en el contexto del movimiento como un todo.

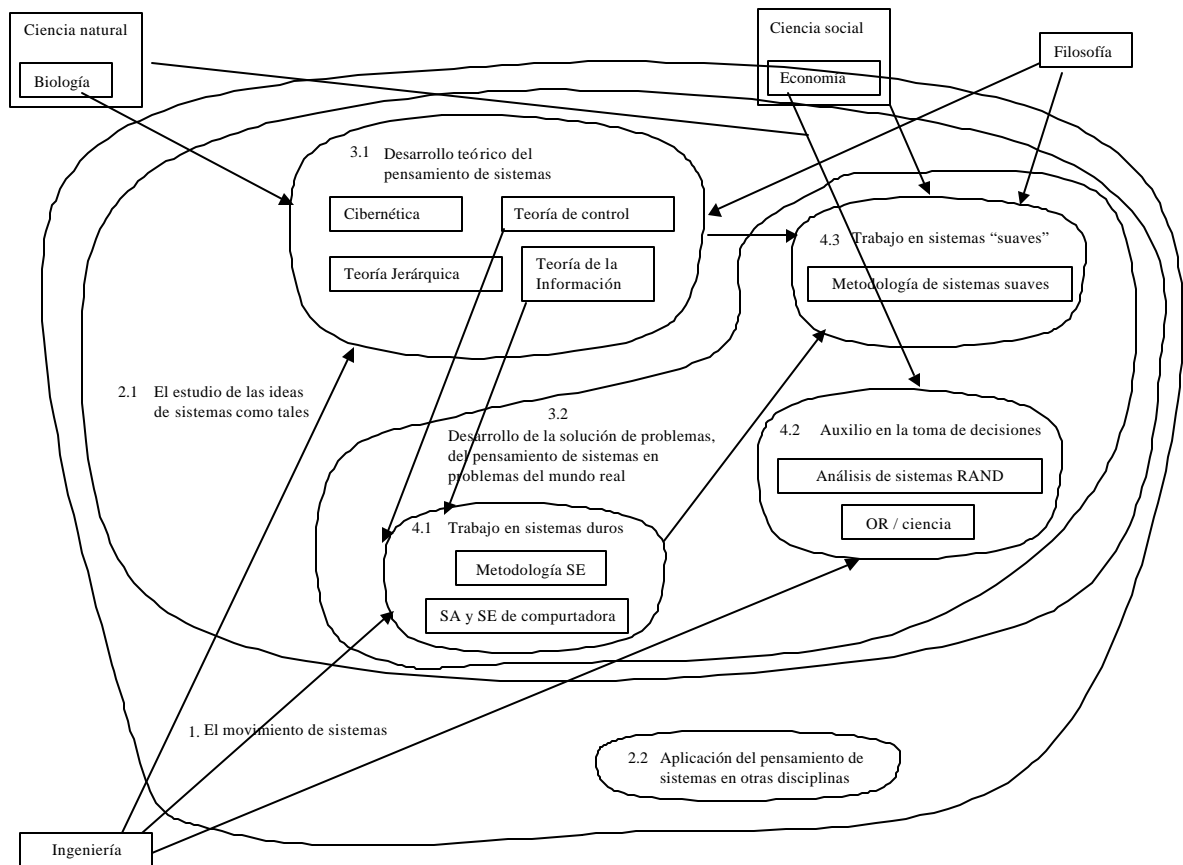


Figura 3. La forma del movimiento de sistemas indicando las influencias externas más importantes.

Si revisamos otra vez la historia completa del movimiento de la ciencia y la emergencia dentro de éste de la actividad de sistemas desplegadas en las figuras 2 y 3, se puede entender la naturaleza de este desarrollo en términos de, por ejemplo cambiar los conceptos de una máquina. El concepto de la máquina, desarrollado por la física newtoniana corresponde al de un mecanismo como de reloj, determinístico y preprogramado. La ciencia moderna, con la creación

de la mecánica cuántica contribuye a la idea de la máquina estática, cuyo detalle fino en su comportamiento no es determinístico. El movimiento de sistemas entonces agrega el concepto de la máquina autorregulada que tiene control autónomo sobre su propio comportamiento. El pensamiento de sistemas ha estado ahora explorando las implicaciones de este concepto por alrededor de treinta años.

Los resultados hasta aquí podrían describirse adecuadamente como “significativos pero no espectaculares”. ¿Por qué el progreso no ha sido más rápido? Una razón es, sin duda alguna, el lazo fuerte que el pensamiento reduccionista tiene sobre cualquier persona educada en la civilización occidental. No es simplemente que el análisis reductivo sea, en la frase de Medawar y Medawar (1977) “la técnica explicativa más exitosa que alguna vez se haya usado en la ciencia”; es también el caso de que la posición contraria al reduccionismo, basada en el holismo y la emergencia, no proporciona una filosofía tan clara. (El aire más que mesiánico de algunos de los escritos de GST es contraproducente en este respecto.) La cuestión la subraya fuertemente Marjorie Grene (1974):

... la postura antirreductibilidad es, para muchas personas, imposible de aceptar. ¿Por qué? Porque ella interfiere con las defensas de un fisicalismo simple de un solo nivel, sin proporcionar una meta física alternativa para que ocupe su lugar. El pensar de manera antirreductiva requiere pensar en términos de sistemas jerárquicos, de niveles de realidad y cosas así; pero nosotros no sabemos ya más cómo pensar de esa manera, cómo enseñarnos así, incluso cómo conocer así: el que la posición contraria sea absurda por sí misma no nos permite abrazar de corazón lo que debiera ser la alternativa más razonable. Porque el antirreductivismo es “razonable”, sólo en el sentido perverso de que su negación es autocontradictoria, no en el sentido más sustantivo de acoplarse suavemente en un *Weltanschauung* en el cual, al igual que la gente educada bajo el ideal de la visión de un mundo “científico”, podamos sentirnos como en casa.

Debe ser la tarea común del movimiento de sistemas el trabajar en una versión del pensamiento de sistemas dentro de la cual podamos sentirnos “como en casa” en un sentido positivo.