

2. La revolución sistémica: una nueva cultura

1. Historia de un enfoque global

Reunir para comprender

Las nociones básicas que se repiten más a menudo en los modelos biológicos, ecológicos y económicos de los capítulos anteriores, se agrupan fácilmente en varias categorías generales: la energía y su utilización; los flujos, los ciclos y los reservorios; las redes de comunicación; los catalizadores y agentes de transformación; el restablecimiento de los equilibrios; la estabilidad, el crecimiento, la evolución. Y, evidentemente, la noción de "sistema" (sistema vivo, sistema económico, ecosistema) que interconecta a todas las demás.

Cada una de estas nociones se aplica a la célula como a la economía: a la empresa como a la ecología. Más allá del vocabulario, de las analogías y de las metáforas, parece existir un *enfoque común* para mejor comprender y describir la complejidad organizada.

Tal enfoque unificador existe efectivamente. Ha nacido, en el curso de los últimos treinta años, de la fecundación de varias disciplinas, entre las cuales se encuentran la biología, la teoría de la información, la cibernética y la teoría de los sistemas. No es una idea nueva: lo que es nuevo es la integración de las disciplinas realizadas en su torno. Este enfoque transdisciplinario se llama *enfoque sistémico*. Es el que simbolizo en este libro por el concepto del macroscopio. No hay que considerarlo como una «ciencia», una «teoría» o una «disciplina», sino como una *nueva metodología que permite reunir organizar los conocimientos con vistas a una mayor eficacia de la acción*.

A diferencia del enfoque analítico, el enfoque sistémico engloba la totalidad de los elementos del sistema estudiado así como sus interacciones y sus interdependencias.

El enfoque sistémico se sustenta en la noción de *sistema*. Esta noción, con frecuencia vaga y ambigua, es, no obstante, empleada hoy en un número creciente de disciplinas, por su poder de unificación y de integración .

Según la definición más usual, « un *sistema es un conjunto de elementos en interacción*». Una ciudad, una célula, un organismo, son sistemas. Pero también un automóvil, un ordenador o ¡una máquina de lavar! Se ve que una definición como ésta es demasiado general. Por lo demás, ninguna *definición* de la palabra sistema puede resultar satisfactoria. Sólo es fecunda la *noción* de sistema. A condición, claro está, de medir su alcance y sus límites.

Estos límites son bien conocidos. Demasiado cómoda, la noción de sistema se emplea a menudo erróneamente y en los dominios más variados educación, gestión, informática o política. Para numerosos especialistas ¡lo es más que una noción vacía: a fuerza de querer decir todo con ella, ya no significa nada.

Mas su alcance no se presta a la precisión de las definiciones La noción de sistema no se deja fácilmente encerrar en una definición. No se revela ni se enriquece sino bajo la iluminación indirecta de los múltiples haces de la expresión analógica, modelizante y

metafórica. La noción de sistema es' la encrucijada de las metáforas. En ella circulan los conceptos provenientes es de todas las disciplinas. Más allá de las analogías, esta circulación permite buscar lo que es común a los más diversos sistemas. No se trata ya de, *reducir* un sistema a otro, considerado como mejor conocido (lo económico a lo biológico, por ejemplo); ni de *transponer lo* que se sabe de un nivel (le complejidad inferior a otro nivel). Se trata de segregar *invariantes*, es decir principios generales, estructurales y funcionales, que puedan aplicarse, tanto a un sistema como a otro. En virtud de esos principios se hace posible organizar los conocimientos en modelos más fácilmente comunicables. Después, utilizar algunos de estos modelos en la reflexión y en la acción, 1a noción de sistema aparece así en sus dos aspectos complementarios: permitir organizar los conocimientos y hacer la acción más eficaz.

Para terminar esta introducción a la noción de sistema, es preciso situar enfoque sistémico con respecto a otros enfoques con los que frecuentemente se confunde:

- El enfoque sistémico sobrepasa y engloba el enfoque *cibernético* (N, WIENER, 1948), cuyo fin principal es el estudio de las regulaciones en los organismos vivos y en las máquinas.
- Se distingue de la *Teoría de los sistemas generales* (L. VON BERTALANFFY, 1954), cuyo fin último consiste en describir y englobar en un formalismo matemático el conjunto de los sistemas encontrados en la naturaleza.
- Igualmente se separa del *análisis de sistemas*. Este método no representa sino una de las herramientas del enfoque sistémico. Considerado aisladamente, conduce a la reducción de un sistema a sus componentes y a interacciones elementales.
- En fin, el enfoque sistémico nada tiene que ver con un *enfoque sistemático*, que consiste en abordar un problema 0 en efectuar una serie de acciones de manera secuencial (una cosa después de otra), detallada, sin dejar nada al azar ni olvidar ningún elemento.

Uno de los mejores medios, tal vez, de percibir la fuerza y el alcance del enfoque sistémico es seguir primero su nacimiento y su desarrollo a través de la vida de los hombres y de las instituciones.

Nuevas herramientas

El proceso del pensamiento es al mismo tiempo analítico y sintético, detallista y englobador. Se apoya en la realidad de los hechos y en la perfección del detalle. Pero paralelamente busca los factores de integración, elementos catalíticos de la invención y de la imaginación. En el momento mismo en que se descubren las unidades más simples de la materia y de la vida, se intenta, gracias a las célebres metáforas del reloj, de la máquina, del organismo, comprender mejor sus interacciones.

Pese a la potencia de estos modelos analógicos, el pensamiento se dispersa en el dédalo de disciplinas aisladas entre sí por tabiques impermeables. La única manera de dominar la multitud, de comprender y de prever el comportamiento de las muchedumbres que constituyen átomos, moléculas o individuos, es ponerlos en estadísticas, y deducir de ellas las leyes de la complejidad inorganizada.

La teoría de las probabilidades, la teoría cinética de los gases, la termodinámica, la estadística de las poblaciones, se apoyan así sobre fenómenos fantásticos e irreales. Sobre simplificaciones útiles pero ideales, casi nunca dadas en la naturaleza: es el universo de lo homogéneo, de lo isótropo, de lo aditivo, de lo lineal. El mundo de los

«gases perfectos», de las reacciones «reversibles» y de la competencia «pura y perfecta».

Más en biología y en sociología los fenómenos integran la duración y la irreversibilidad. Las relaciones entre los elementos cuentan tanto como los propios elementos. Eran, pues, necesarias nuevas herramientas para abordar la complejidad organizada, la interdependencia y la regulación.

De la cibernética a la sociedad

Esas herramientas han visto la luz en la América de los años 40, producto de la interfecundación de las ideas, caldo de cultivo que es típico de los grandes centros universitarios.

Para ilustrar una nueva corriente de pensamiento suele ser útil tomar un eje de referencia. Este eje será el Massachusetts Institute of Technology, más conocido por las siglas MIT. En tres saltos, cada uno de alrededor de diez años, el MIT va a conducirnos de la cibernética a la actualidad más viva: los debates acerca de los límites del crecimiento. Cada salto viene marcado por idas y venidas -clásicos del enfoque sistémico entre máquina, organismo, sociedad. A lo largo de esta circulación de las ideas se efectúan transferencias de métodos y de terminologías que fertilizan, a su vez, territorios inexplorados.



En los años 40, el primer salto conduce de la máquina al organismo, transfiriendo de la una al otro las nociones de retroacción (*feedback*) y de finalidad, y abriendo la vía a la automatización y a la informática.



En los años 50, la vuelta del organismo a la máquina. Con la aportación de las nociones de memoria y de reconocimiento de formas, de fenómenos adaptivos y de aprendizaje; los nuevos caminos de la biónica¹, la inteligencia artificial, los robots industriales. También el retorno de la máquina al organismo, acelerando los progresos en neurología, percepción, mecanismo de la visión.



Desde los años 60, en fin, el MIT vive la extensión de la cibernética y de la teoría de los sistemas a la empresa, a la sociedad y a la ecología

Tres hombres pueden ser considerados como los artesanos de estos grandes avances: el matemático NORBERT WIENER fallecido en 1964 el neurofisiólogo WARREN

¹ La biónica trata de construir máquinas electrónicas que imiten determinados órganos de los seres vivos.

McCULLOCH desaparecido en 1969, Y JAY FORRESTER, profesor en la Sloan School of Management del MIT.

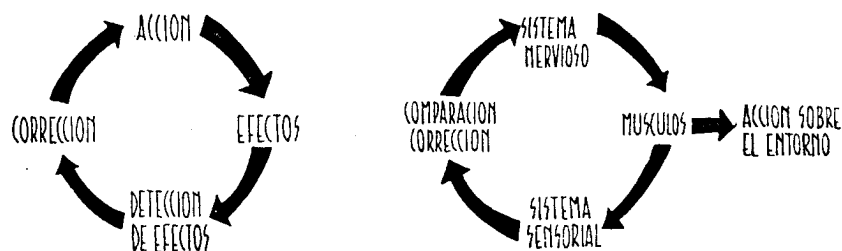
Es obvio que otros hombres, otros equipos y otras universidades, tanto en los Estados Unidos como en el resto del mundo, han coadyuvado al avance de la Cibernética y de la teoría de los sistemas. Hablaremos de ellos cada vez que su trayectoria coincida con la de los equipos del MIT

Máquinas « inteligentes »

Desde 1919 NORBERT WIENER enseña matemáticas en el MIT. Poco después de su entrada en el instituto conoce al neurofisiólogo ARTURO ROSENBLUETH antiguo colaborador de WALTER B. CANNON (recuérdese la homeóstasis, pág. 56), que trabaja en la Harvard Medical School. De esta amistad nacería, veinte años más tarde, la cibernética. ROSENBLUETH instaura, con WIENER pequeños equipos interdisciplinarios con el fin de explorar las *no man's land* entre las ciencias establecidas.

En 1940, WIENER trabaja con un joven ingeniero, JULIAN H. BIGELOW, en el desarrollo de aparatos de puntería automática para cañón antiaéreo.

Tales servomecanismos deben predecir la trayectoria de un avión sobre la base de elementos de trayectorias anteriores. En el transcurso de su trabajo, WIENER y BIGELOW se ven sorprendidos por dos fenómenos curiosos: el comportamiento «inteligente», en apariencia, de este tipo de máquinas y las «enfermedades» que pueden afectarles. Comportamiento «inteligente», ya que se apoyan en la «experiencia» (el registro de hechos anteriores) y en la previsión del futuro. Mas, también, extraño defecto de funcionamiento: si se intenta reducir los rozamientos, el sistema entra en una serie de oscilaciones incontrolables. Impresionado por esta "enfermedad" de la máquina, WIENER pregunta a ROSENBLUETH Si Un Comportamiento semejante se da en el ser humano. La respuesta es afirmativa: en ciertas lesiones del cerebelo el enfermo es incapaz de llevar un vaso de agua a su boca; los movimientos se van amplificando hasta que el contenido del vaso se derrama. De ello deduce WIENER que, para controlar una acción propositiva (es decir, orientada hacia un objetivo), la circulación de la información necesaria para este control debe formar «un bucle cerrado que permita evaluar los efectos de sus acciones y adaptarse a una conducta futura gracias a los resultados habidos». Es la característica del aparato de puntería de DCA, pero lo es igualmente del sistema nervioso cuando ordena a los músculos un movimiento cuyos efectos son detectados por los sentidos y enviados al cerebro.



WIENER y BIGELOW descubren de esta forma el bucle circular de información necesario para corregir cualquier acción, el bucle de *retroacción*² *negativa* (*negative feedback*), y *generalizan* tal descubrimiento al organismo vivo.

Durante este tiempo se constituyen y organizan los grupos pluridisciplinarios de ROSENBLUETH. Su objetivo es abordar el estudio de los organismos vivos con la mirada del constructor de servomecanismos y, recíprocamente, considerar los servomecanismos con la experiencia del fisiólogo. En 1942 se desarrolla un primer seminario en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Agrupa matemáticos, fisiólogos, ingenieros mecánicos y electrónicos. Ante el éxito obtenido se organiza una serie de diez seminarios en la Josiah Macy Foundation. Hay un hombre que trabaja con ROSENBLUETH en la animación de los seminarios: el neurofisiólogo WARREN MCCULLOCH, que desempeñaría un papel relevante en el desarrollo de la joven cibernética. En 1948, dos publicaciones fundamentales marcan una época, ya de por sí fértil en ideas originales: el libro de NORBERT WIENER *Cybernetics, o Regulación y comunicación en el animal y en la máquina*; y *la Teoría matemática de la comunicación*, de CLAUDE SHANNON y WARREN WEAVER, que funda la teoría de la información.

Copiar al organismo vivo

Las ideas de WIENER, BIGELOW y ROSENBLUETH se expanden como reguero de pólvora. Otros grupos se forman en los Estados Unidos y en el mundo. Es de destacar la Society for General Systems Research, cuyas Publicaciones tocan disciplinas alejadas de la ingeniería, como la sociología, las ciencias políticas o la psiquiatría.

Los seminarios de la Josiah Macy Foundation prosiguen y se abren a nuevas disciplinas: la antropología con MARGARET MEAD, la economía con OSKAR MORGENSTERN. MARGARET MEAD empuja a N. WIENER a extender sus ideas a la sociedad en su conjunto. Pero este período queda señalado por la profunda influencia de WARREN MCCULLOCH, director del Instituto de Neuropsiquiatría de la Universidad de Illinois.

A consecuencia de los trabajos de su equipo acerca de la organización de la corteza cerebral y, sobre todo, de sus discusiones con WALTER PITTS brillante matemático de veintidós años, MCCULLOCH se da cuenta de que un principio de comprensión de los mecanismos cerebrales (y su simulación por máquinas) no puede resultar más que de la cooperación de numerosas disciplinas. El mismo pasa de la neurofisiología a las matemáticas; de las matemáticas a la ingeniería.

WALTER PITTS se convierte asimismo en uno de los discípulos de NORBERT WIENER y contribuye a transferir ideas entre WIENER y MCCULLOCH. Es él, una vez más, quien consigue convencer a MCCULLOCH de venir a instalarse, en 1952, en el MIT, con todo su equipo de fisiólogos.

En este crisol bullen las ideas. De uno a otro grupo de investigación se emplea indistintamente el vocabulario de la ingeniería o de la fisiología. Poco a poco van implantándose las bases del lenguaje común de los cibernéticos: aprendizaje, regulación, adaptación, autoorganización, percepción, memoria. Influido por las ideas de BIGELOW, MCCULLOCH desarrolla, con Louis SUTRO, del laboratorio de instrumentación del MIT, una retina artificial. La base teórica procede de sus trabajos sobre el ojo de la rana, efectuados en colaboración con LETTVIN MATURANA Y PITTS

² N. del T. También realimentación.

en 1959. La necesidad de hacer ejecutar por máquinas determinadas, funciones propias de los organismos vivos contribuye, en contrapartida, a acelerar los progresos de los conocimientos acerca de los mecanismos cerebrales. Este es el punto de partida de la *biónica*, los trabajos sobre la *inteligencia artificial* y los robots.

Paralelamente a los trabajos de los equipos de WIENER y de McCULLOCH en el MIT, otro grupo trata de englobar la cibernética en un marco más amplio, es la Sociedad para el Estudio de los Sistemas Generales (*Society for General Systems Research*), creada en 1954 y animada por el biólogo LUDWIG VON BERTALANFFY. A él irán a unirse numerosos investigadores: el matemático A. RAPOPORT, el biólogo W. Ross ASHBY, el biofísico N. RASHEVSKY, el economista K. BOULDING. En 1954 comienzan a aparecer los cuadernos anuales de la Sociedad (*General Systems Yearbooks*). Su influencia será profunda sobre todos aquellos que tratan de extender el enfoque cibernético a los sistemas sociales y, en particular, a la empresa.

De la dinámica industrial a la dinámica mundial

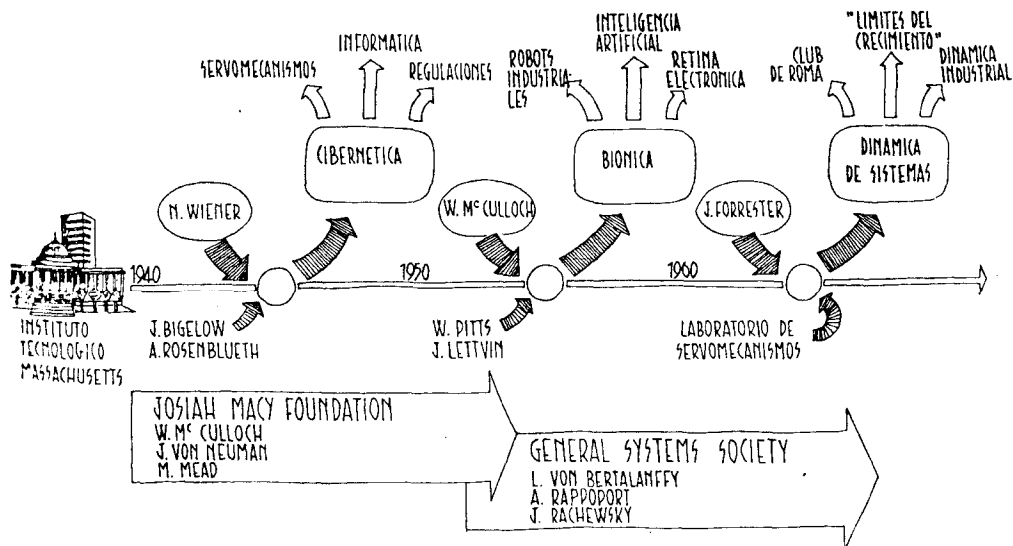
A lo largo de los años 50 se desarrolla y perfecciona una herramienta que iba a permitir afrontar la MIT en 1951. Utilizaba, por vez primera, una memoria magnética ultrarrápida inventada por un joven ingeniero electrónico del laboratorio de servomecanismos: JAY W. FORRESTER³.

A la cabeza del Lincoln Laboratory, FORRESTER recibe de la Fuerza Aérea el encargo de coordinar la puesta a punto de un sistema de alerta y de defensa (SAGE⁴ System) empleando, por primera vez juntos, radares y ordenadores. Su misión es detectar e impedir un posible ataque del territorio americano por cohetes enemigos. FORRESTER percibe la importancia del enfoque sistémico en la concepción y el control de organizaciones complejas en que intervengan hombres y máquinas interconectadas en "tiempo real", es decir, capaces de tomar decisiones vitales *según van llegando las informaciones*.

Ya profesor de la Sloan School of Management del MIT, FORRESTER crea en 1961 la dinámica industrial (*Industrial Dynamics*). Su objetivo: considerar las empresas como sistemas cibernéticos, para simular (e intentar prever) su comportamiento. En 1964, enfrentado con problemas del crecimiento y degeneración de las ciudades, extiende la dinámica industrial a la de los sistemas urbanos (*Urban Dynamics*). Finalmente en 1971, generaliza sus anteriores trabajos creando una nueva disciplina, la «dinámica de los sistemas», y publica la obra *World Dynamics*. Este libro servirá de base a los trabajos de DENNIS H. MEADOWS y de su equipo sobre los límites del crecimiento. Financiados por el Club de Roma, estos trabajos habrían de tener el eco mundial de todos conocido, bajo el nombre de *Informe del MIT*

³ Después IBM utilizaría tales memorias en todos sus ordenadores, Este tipo de memoria, (de la que FORRESTER conserva aún las principales patentes) está en fase de ser sustituida por las memorias de semiconductores. Aún equipa hoy la mayoría de los ordenadores en activo.

⁴ SAGE: Semi-Automatic Ground Equipment.



El esquema anterior agrupa a los investigadores y equipos mencionados más arriba, recordando las principales vías abiertas por sus trabajos.

2. ¿Qué es un sistema?

El arte de conducir a los hombres

El enfoque sistémico se apoya en la cibernética y en la teoría de los sistemas. Por ello es útil recordar aquí algunas definiciones. La cibernética es la disciplina que estudia las regulaciones y la comunicación en los seres vivos y en las máquinas construidas por el hombre. Una definición más filosófica, propuesta por LOUIS COUFFIGNAL en 1958, considera la cibernética como «*el arte de asegurar la eficacia de la acción*». El vocablo cibernética fue reinventado en 1948 por Norbert Wiener a partir de la palabra griega *Kybernetes*, que significa «piloto» o «timón⁵». A uno de los primerísimos mecanismos cibernéticos de regulación de la velocidad de una máquina de vapor, inventado por JAMES WATT y MATTHEW BOULTON en 1788, se le llamó *governor* (regulador de bolas). Cibernética tiene, por consiguiente, la misma raíz que gobierno: el arte de administrar y de conducir sistemas de muy alta complejidad.

Existen otras definiciones de la palabra «sistema» aparte de la que se ha dado al principio de este capítulo. La más completa es la siguiente: «*Un sistema es un conjunto de elementos en interacción dinámica, organizados en función de un objetivo*».

La introducción de la finalidad (el objetivo del sistema) en esta definición puede sorprender. Se comprende que la finalidad de una máquina haya sido definida y especificada por el hombre, pero ¿qué decir de la finalidad de un sistema como la célula? El «objetivo» de la célula no tiene nada de misterioso. No traduce ningún proyecto. Se comprueba a posteriori: mantener su estructura y dividirse. Análogamente ocurre en el ecosistema. Su finalidad es mantener sus equilibrios y permitir el desarrollo

⁵ Esta palabra fue utilizada por vez primera por Platón en el sentido de «arte del pilotaje», o de «arte de conducir a los hombres». En 1834, AMPÈRE se sirvió de la palabra cibernética para designar al «estudio de los medios de gobierno».

de la vida. Nadie ha fijado el contenido del aire en oxígeno, la temperatura media del globo, la composición de los océanos. Y, sin embargo, se mantienen entre límites muy estrictos.

La definición anterior se aparta de otra de una determinada tendencia estructuralista, para la que un sistema es una estructura cerrada. Tal estructura no puede evolucionar, sino que pasa por fases de desmoronamiento debidas a un desequilibrio interno.

De hecho, tales definiciones, como se ha dicho antes, son demasiado generales para ser auténticamente útiles. No permiten clarificar ambigüedades de expresiones tales como: «un hombre de sistemas», «tener la mente de sistemas», «un sistema político», «un sistema informático» o un «sistema de transporte».

Por el contrario, me parece mucho más fecundo enriquecer el concepto de sistema describiendo, de la forma más general posible, las principales características y propiedades de los sistemas, cualquiera que sea su nivel de complejidad⁶.

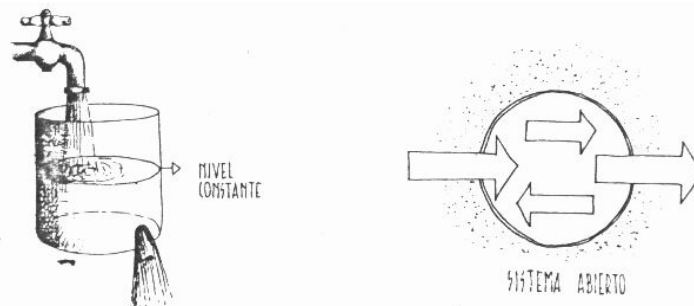
Abertura y complejidad

Cada una de las muñecas rusas descritas en el primer capítulo es un sistema *abierto* y de muy grande *complejidad*, nociones estas importantes en las que merece la pena detenerse.

Un *sistema abierto* está en relación permanente con su entorno (generalizando, se podría decir con su ecosistema). Intercambia energía, materia, informaciones utilizadas en el mantenimiento de su organización frente a la degradación provocada por el tiempo. Arroja al entorno entropía, energía «usada».

Gracias al flujo de energía que lo atraviesa, y pese al aumento de la entropía del entorno, la entropía de un sistema abierto se mantiene a un nivel relativamente bajo. Lo que equivale a decir que la organización de este sistema se conserva. Los sistemas abiertos pueden, pues, disminuir localmente la entropía, e incluso evolucionar hacia estados de mayor complejidad.

En cierta forma, un sistema abierto es un depósito que se llena y se vacía a la misma velocidad: el agua se mantiene al mismo nivel siempre que los caudales de entrada y de salida permanezcan idénticos.

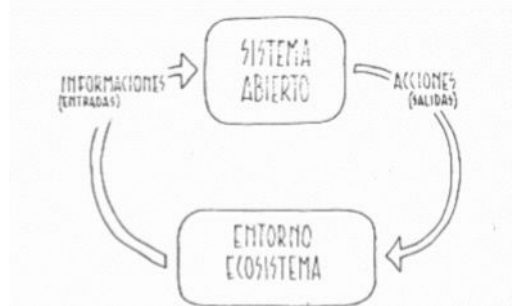


Para poner de manifiesto la generalidad y la importancia de la noción de sistema abierto he utilizado el mismo tipo de esquema de base para la empresa, la ciudad, el organismo o la célula.

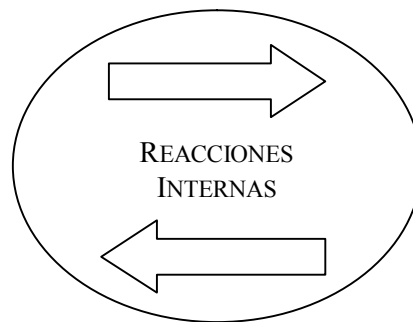


⁶ No considero aquí los « sistemas, de conceptos », ni los sistemas mecánicos pilotados por el hombre, sino más bien sistemas de alta complejidad, como los sistemas vivos, sociales o ecológicos.

Por último, no debe nunca olvidarse que sistema abierto y ecosistema (entorno) están en constante interacción, *modificando uno al otro y siendo modificado, a su vez.*



Un *sistema cerrado* no intercambia ni energía, ni materia, ni información, con su entorno: está totalmente aislado del mundo exterior. El sistema emplea su reserva de energía potencial interna. A medida que tienen lugar las reacciones, se incrementa de manera irreversible su entropía. Al alcanzarse el equilibrio termodinámico, la entropía es máxima: el sistema no es capaz ya de suministrar trabajo. La termodinámica clásica no estudia más que sistemas cerrados. Ahora bien, un sistema cerrado es una abstracción de los físicos: una simplificación que ha permitido establecer las leyes generales de la físico-química.



SISTEMA CERRADO

¿Cómo definir la *complejidad*? O mejor, a fin de evitar las definiciones, ¿Cómo ilustrar y enriquecer el significado de esta palabra? Dos nociones son importantes: variedad de los elementos e interacción entre los elementos.

Un gas sistema simple, está compuesto de elementos semejantes entre sí (moléculas de oxígeno, por ejemplo), no organizadas y débilmente interactuantes. Por el contrario, una célula, sistema complejo, comporta una muy grande variedad de elementos organizados y fuertemente interconectados. Así se puede ilustrar la noción de complejidad por los puntos siguientes:

- Un sistema complejo está constituido por una gran variedad de componentes o de elementos dotados de funciones especializadas.
- Estos elementos están organizados en *niveles* jerárquicos internos (por ejemplo, en el cuerpo humano, las células, los órganos, los sistemas de órganos)
- Los diferentes niveles y elementos individuales están unidos por una gran variedad de *enlaces*, de lo que resulta una elevada densidad de interconexiones*.

* La variedad definida por W. Ross Ashby es el “número de elementos diferentes que comporta un sistema o el número de relaciones diferentes entre estos elementos o de estados diferentes de estas relaciones”. Ahora bien, la variedad de un sistema relativamente simple que conste de siete elementos conectados por relaciones orientadas en

- Las interacciones entre los elementos de un sistema complejo son de tipo particular. Se dice que estas interacciones son *no lineales*.

dos sentidos y con dos estados posibles cada una, se expresa ya por la cifra enorme de 2^{42} . ¿Qué decir de las interacciones que se tejen en el seno de la población celular (ver pág.61) y *a fortiori* en el seno de la sociedad?