

EL MACROSCOPIO
JOEL DE ROSNAY
Capítulo 1.

1.- A través del macroscopio.

Hoy, el mundo es mensajes, códigos, informaciones. ¿Qué disección dislocará mañana nuestros objetos para recomponerlos en un espacio nuevo? ¿Qué nueva muñeca rusa emergerá de ello? FARNCOIS JACOB

El átomo, la molécula, la célula, el organismo, la sociedad se encajan unos en otros como un juego de muñecas rusas. La mayor de estas muñecas tiene las dimensiones del planeta. Engloba a la sociedad de los hombres y a sus economías. A las ciudades y empresas que transforma en mundo. A los organismos vivos y a las células que los componen.

Podría continuarse así abriendo otras muñecas, hasta llegar a las partículas elementales. Detengámonos aquí.

La finalidad de esta exploración preliminar es doble. Se trata, en primer lugar, de comunicar un “saber mínimo” en ecología, economía y biología, disciplinas que hoy nos fuerzan a modificar nuestros modos de pensar. No es frecuente que estas tres disciplinas se presenten reunidas en un mismo enfoque, lo que entraña un riesgo, aunque también una ventaja. El riesgo es que cada uno encontrará quizá demasiado esquemático, acaso simplista, el capítulo dedicado al campo que mejor conoce. La ventaja -que se desprende directamente de la utilización de “macroscopio”- es que todos podrán descubrir igualmente, en otros campos, nuevas informaciones que contribuirán quizá a enriquecer y ampliar su personal enfoque.

Se trata después, de introducir las nociones de “sistema” y de “enfoque sistémico”, bases de la nueva cultura: la del “honesto hombre” del siglo XXI. Abrir cada muñeca deja pasar los ejemplos y la práctica antes que la teoría general. Y, una vez más, nada le impide a usted comenzar por el segundo capítulo sobre los sistemas.

1. La ecología.

El medio vivo.

Toda forma de vida en la tierra reposa sobre el funcionamiento presente o pasado del ecosistema. Desde la más pequeña bacteria hasta el más profundo de

los bosques. Desde el plancton frágil de los océanos hasta el hombre, su agricultura y su industria. Gracias a las reservas de energía acumuladas pro la vida se mantienen las complejas estructuras de la sociedad: grandes ciudades, industrias o redes de comunicación.

Literalmente, el ecosistema es la “casa” de la vida, y la ecología es la ciencia que lo estudia. El vocablo fue creado en 1886 por el biólogo alemán ERNEST HAECKEL a partir del griego *oikos*, casa, y *logos*, ciencia. Estudia las relaciones existentes entre los seres vivos y el medio en que viven.

El ecosistema es bastante más que un simple <medio en que se vive>. De alguna manera, es un organismo vivo. Sus centrales biológicas producen miles de millones de toneladas de materias orgánicas. Sucesivamente almacenadas, distribuidas, consumidas, recicladas en forma de elementos minerales, son reinyectadas en esas mismas centrales para ser allí alimentadas con energía solar y volver a los circuitos que mantienen la vida de toda organización.

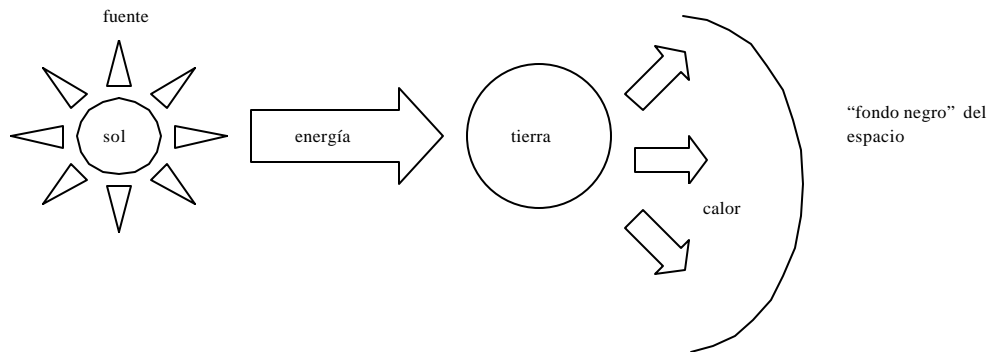
¿Por qué movimientos, por qué transformaciones, se manifiesta a nosotros esta “vida” del ecosistema? Primero, por la circulación atmosférica, los vientos, los movimientos de las nubes, las precipitaciones, todo aquello que podría verse observando la tierra desde un punto suficientemente alejado. Por la circulación de las aguas, de los arroyos y de los ríos que descienden hacia los mares, por las grandes corrientes de los océanos y de los desplazamientos de los hielos. Por los movimientos de la tierra, sacudidas sísmicas, volcanes, erosión y sedimentación; y, a lo largo de un intervalo temporal adecuadamente dilatado, por la formación de cadenas de montañas. Después, por los ciclos de la vida en los que se fabrican, intercambian y circulan en una ronda perpetua los materiales de base de los seres vivos.

Una caída de energía.

Todos estos movimientos, estos desplazamientos, estas transformaciones, requieren energía. Cualesquiera que sean su naturaleza y su variedad toman esta energía de tres fuentes principales: las radiaciones solares, la energía interna del globo (de orden sísmico o térmico) y la gravedad. Es obvio que la energía de las radiaciones solares es, con mucho, la más importante de las tres, puesto que representa un 99 por 100 del balance energético de nuestro planeta. Incluso la energía suministrada por los combustibles fósiles no es otra cosa que energía solar “en conserva”.

La energía solar hace, pues, “girar” a los ciclos del ecosistema. Es sabido que, para hacer girar una máquina, esto es, para producir un *trabajo*, es necesario que la energía “fluya” desde una fuente caliente a un <sumidero> frío, en donde se pierde para siempre. En el caso del sistema sol-tierra, la fuente caliente está representada por el flujo de energía solar (radiaciones de pequeña longitud de

onda), y el “sumidero” por el espacio intersidereal frío, que recoge el calor directamente reflejado por la tierra o producido por los procesos geológicos, biológicos o industriales que en ella tienen lugar.

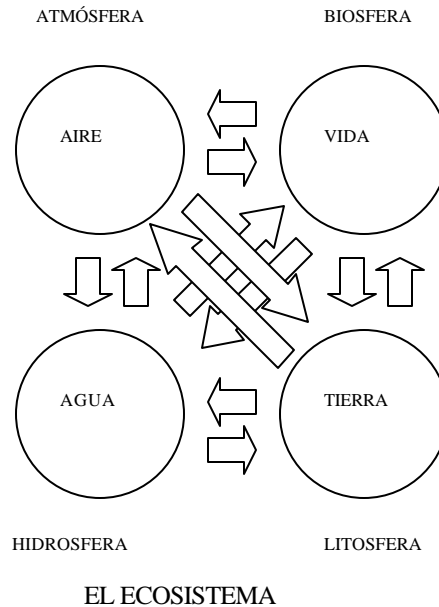


Además del trabajo que con ello se produce (los movimientos y transformaciones brevemente descritos), la tierra equilibra su balance energético y, por consiguiente, mantiene constante su temperatura a causa de la radiación del calor hacia el espacio. Se establece un equilibrio entre la energía recibida (empleada en los procesos geológicos y biológicos) y la energía degradada en calor irrecuperable^{*}, irradiada hacia el espacio. Solamente una fracción ínfima de la inmensa cantidad de energía solar recibida cotidianamente por la tierra es utilizada por los seres vivos.

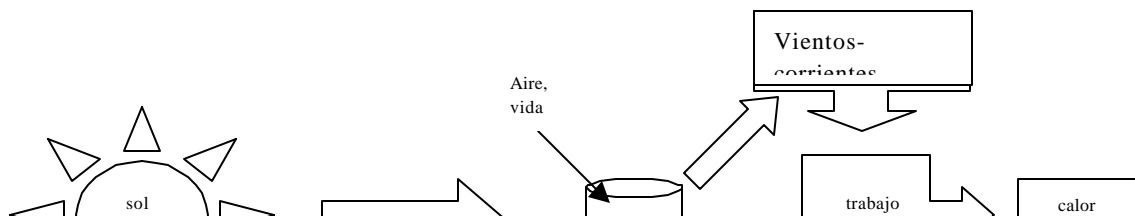
Una botella, agua, aire, rocas y vida.

El ecosistema se compone de cuatro dominios en estrecha interacción: el aire, el agua, la tierra y la vida, a los que se denomina respectivamente *atmósfera*, *hidrosfera*, *litosfera* y *biosfera*. Las flechas del siguiente esquema indican que cada dominio se comunica con los otros. Así, por ejemplo, los sedimentos del fondo de los mares no escapan a esta regla: su composición depende, no solamente de la vida marina y de la composición de los océanos, sino también de la atmósfera.

^{*} A esta energía degradada en calor irrecuperable se le llama *entropía*.



El flujo de energía que atraviesa el ecosistema es *irreversible e inagotable*. Sin embargo, los elementos químicos que construyen todas las formas minerales u orgánicas que conocemos en la tierra existen en *número finito*. Tales elementos deben ser hallados en el seno mismo del ecosistema y *reciclados* posteriormente a su uso. Todo lo que vive está fabricado a partir de un juego de construcción de sólo seis elementos básicos: el carbono (C), el hidrógeno (H), el oxígeno (O), el nitrógeno (N), el azufre (S) y el fósforo (P). Se conservan las estructuras, pero se sustituyen sus elementos constructivos. A esta renovación dinámica la llaman los biólogos anglosajones el *turnover*. Los seres vivos (y las colonias que ellos forman: bosques, poblaciones, arrecifes de coral...) están siendo, así, continuamente ensamblados y desmontados. Por ello el ecosistema tiene que disponer de un acopio considerable de elementos de repuesto, asegurar su reciclaje (puesto que ninguno se produce de *novo*) y controlar el conjunto por un sistema de regulación que evite tanto las carencias como los excesos.



Para poner de manifiesto el carácter limitado del ecosistema, se lo puede imaginar en forma de una simple botella con agua, aire, rocas y una delgada capa de vida.

Expuesta al sol, la botella se convierte en el centro de una sorprendente actividad. Al incidir sobre ella los rayos solares en lugares, y según ángulos, diversos, se producen diferencias de temperatura y corrientes de convección que provocan movimientos del aire y del agua. (Análogamente ocurre sobre la tierra: diferencias de temperatura y corrientes de convección que provocan movimientos del aire y del agua, produciendo los vientos, las precipitaciones, las olas y las corrientes).

Si esta botella contuviera algas muy simples unicelulares –pero capaces de realizar la fotosíntesis- y protozoos (animales microscópicos también unicelulares), podrían ponerse en marcha los ciclos biológicos. La materia orgánica producida por las algas, gracias a los rayos del sol, sería <quemada> por los protozoos. Esta combustión produciría energía que les permitiría, entre otras, desplazarse en busca de alimento. La combustión se efectúa en presencia del oxígeno desprendido por las algas. Y a partir del gas carbónico, residuo mineral de la combustión, las algas fabricarían la materia orgánica. Con ello se cerraría el ciclo, habiéndose reutilizado todos los elementos de la botella.

En el ecosistema terrestre, los elementos esenciales a la vida son sucesivamente utilizados y regenerados en el curso de grandes ciclos bien conocidos: los ciclos del nitrógeno, del azufre, del fósforo. Estos elementos circulan entre tres grandes depósitos* donde son almacenados durante periodos más o menos largos. Hay el depósito de la atmósfera (y de la hidrosfera), el depósito de la biomasa (la masa de materia orgánica representada por el conjunto de los seres vivos) y el depósito de los sedimentos. Al pasar de uno a otro depósito de combinan

* N. del T. Se utilizarán indistintamente depósito, reserva (en el sentido de continente además del de contenido), reservorio por el francés <reservoir> que se escribe igual en inglés.

los elementos bajo aspectos diferentes: Moléculas de gas en la atmósfera, ion ^{**} soluble en la hidrosfera, sal cristalizada en los sedimentos, moléculas orgánicas en las reservas de vida.

En la atmósfera los elementos adoptan el aspecto de moléculas de gas: nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂), anhídrido sulfuroso (SO₂), gas carbónico (CO₂). En la hidrosfera, en los sedimentos o en el suelo se los encuentra en forma de iones solubles o enlazados como sales (carbonatos, nitratos, sulfatos).

La economía de la naturaleza: producción, consumo, descomposición

Se puede considerar la etapa orgánica de los ciclos ecológicos (la de la reserva de la vida) como el auténtico “motor” del conjunto de los ciclos. En el transcurso de esta etapa es cuando son fabricadas y consumidas las principales sustancias responsables de la conservación de la vida, cuando se regula el contenido en oxígeno de la atmósfera o cuando se acopian millares de millones de toneladas de materias. Todos ellos gracias a una organización condicionante de una “industria” y una “economía” modélicas: Producción, almacenamiento, distribución, consumo, repartición equitativa de la energía, reciclaje completo de las materias. Los tres grupos de organismos sobre los que reposan esta industria y esta economía son *los productores, los consumidores y los descomponedores*.

Los *productores* son las plantas verdes o los vegetales acuáticos y, más generalmente, todos los organismos capaces de realizar la *fotosíntesis*, esto es, la fabricación de materias orgánicas a partir de la sola luz solar y del gas carbónico mineral (se les llama también, autótrofos).

Los *consumidores* son los animales de cualquier tamaño, herbívoros y carnívoros, terrestres o acuáticos, que se nutren de organismos vivos y queman la materia orgánica de los tejidos de sus presas, en virtud de una reacción interna de oxidación: la *respiración* (se les llama, también, heterótrofos).

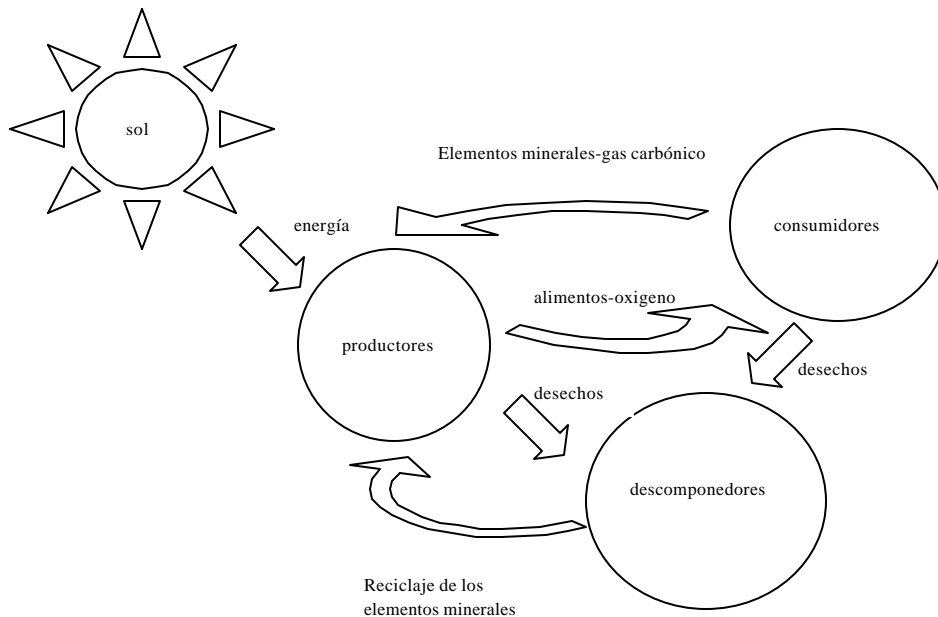
Los *descomponedores* se nutren de organismos muertos o de sustancias químicas dispersas en el ambiente.

El siguiente esquema resume las relaciones entre los tres grupos mencionados, cuya actividad constituye la base del funcionamiento del ecosistema y de la regulación de su equilibrio.

Durante el día los productores fabrican grandes cantidades de materiales orgánicos que se acumulan en las células vegetales. Al tiempo, se produce una enorme exhalación de oxígeno. A la noche prevalecen los procesos de oxidación: los consumidores oxidan -queman- la materia orgánica recién fabricada y almacenada,

** Un ion es un átomo que ha perdido o ganado electrones

a fin de producir la energía necesaria para realizar su trabajo. Este es el proceso de la respiración. Está claro que los animales, los vegetales y los descomponedores respiran también por el día, pero los procesos diurnos de producción son de tal importancia que dejan en un plano absolutamente secundario las reacciones de oxidación que simultáneamente tienen lugar.

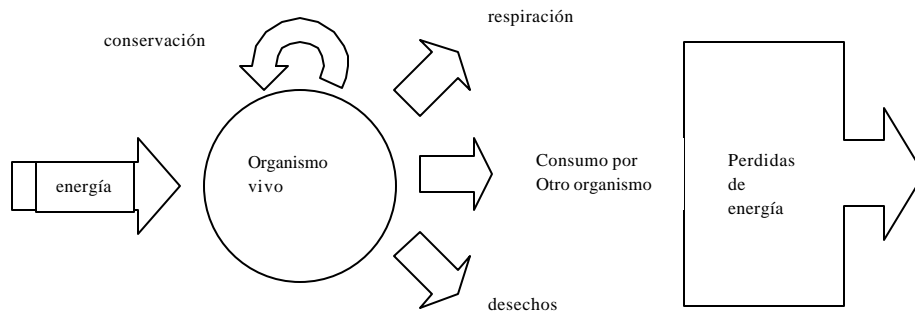


Las reacciones básicas de la vida, producción y consumo (es decir, fotosíntesis y respiración) están emparejadas. Existe una gran diferencia entre los organismos capaces de transformar la energía radiante (la luz) y los que transforman la energía fijada, esto es, la energía latente en los enlaces químicos de las moléculas orgánicas. Este último tipo de energía no se libera más que cuando se rompen dichos enlaces. Es lo que sucede en el transcurso de una combustión libre (el fuego) o controlada (la respiración).

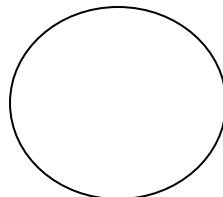
La energía fijada circula a todo lo largo de la cadena alimentaria (también denominada cadena trófica) constituida por los consumidores, es decir, los herbívoros y los distintos niveles de carnívoros, que sacan el máximo provecho de la energía previamente almacenada en los tejidos de los organismos que capturan y que les preceden en la cadena. Esta energía se emplea hasta su último <miga> en la descomposición de los cadáveres de animales o vegetales. Los microorganismos encuentran aún energía que extraer en moléculas orgánicas relativamente simples, transformándolas en moléculas minerales para la circulación por los circuitos del ecosistema.

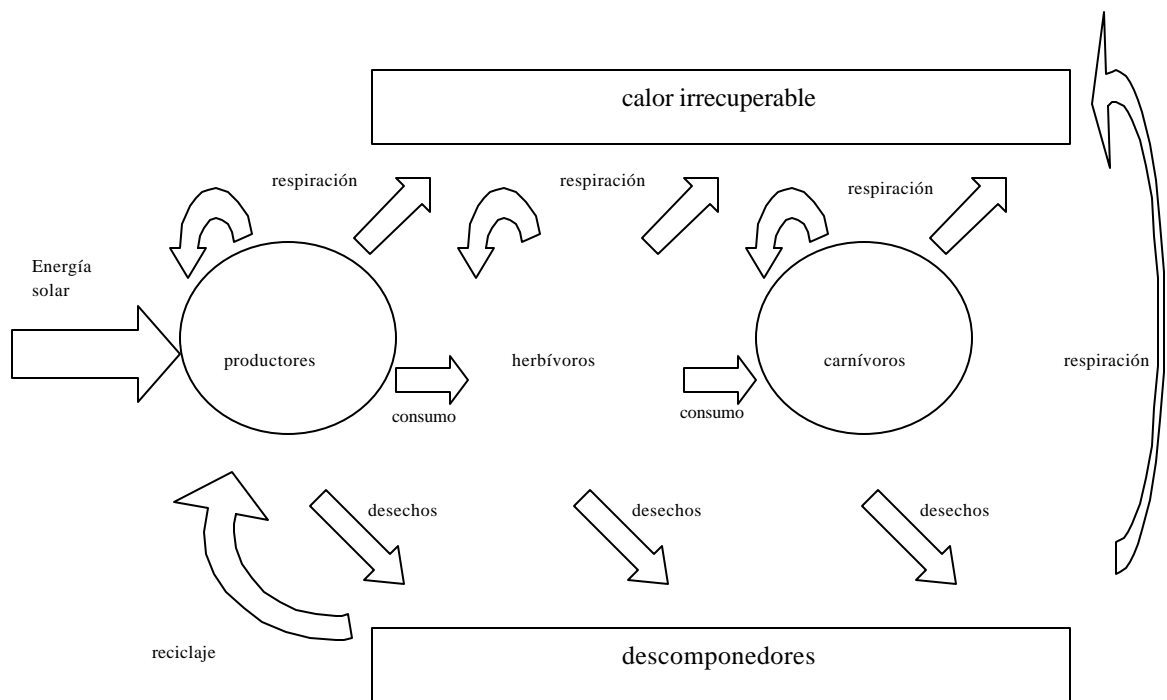
Cualquiera que sea el organismo transformador, se pierde energía en la cadena alimentaria de tres maneras diferentes.

- Por la *respiración*, ya que la energía no puede producir trabajo si no es degradándose en calor irrecuperable.
- Por el *consumo* por otros organismos de tejidos vegetales o animales que previamente han acopiado energía.
- Y, por último, a través de la *descomposición* de los organismos muertos y de la eliminación por vegetales y animales de exudados y excrementos.



Situando uno tras otro varios esquemas de este tipo, se puede uno hacer idea de fluir de la energía en la cadena alimentaria y de las pérdidas que en ella se producen.





La eliminación de desechos y el reciclaje.

Si el papel de los vegetales-productores y de los animales-consumidores es, en general, bien conocido, el de los microorganismos descomponedores lo es bastante menos. Y, sin embargo, es gracias a su prodigiosa actividad como los desechos orgánicos se transforman en sustancias almacenadas en los sedimentos, el abrigo de la oxidación, en forma de moléculas solubles, transportadas por el agua de torrentera, o de moléculas gaseosas liberadas en la atmósfera. Formas todas reutilizadas, a plazo más o menos largo, por el ecosistema.

¿Qué son los descomponedores? Bacterias, algas, hongos, levaduras, protozoos, insectos, moluscos, gusanos; toda una bulliciosa población de minúsculos seres con apetitivo y actividad insaciables.

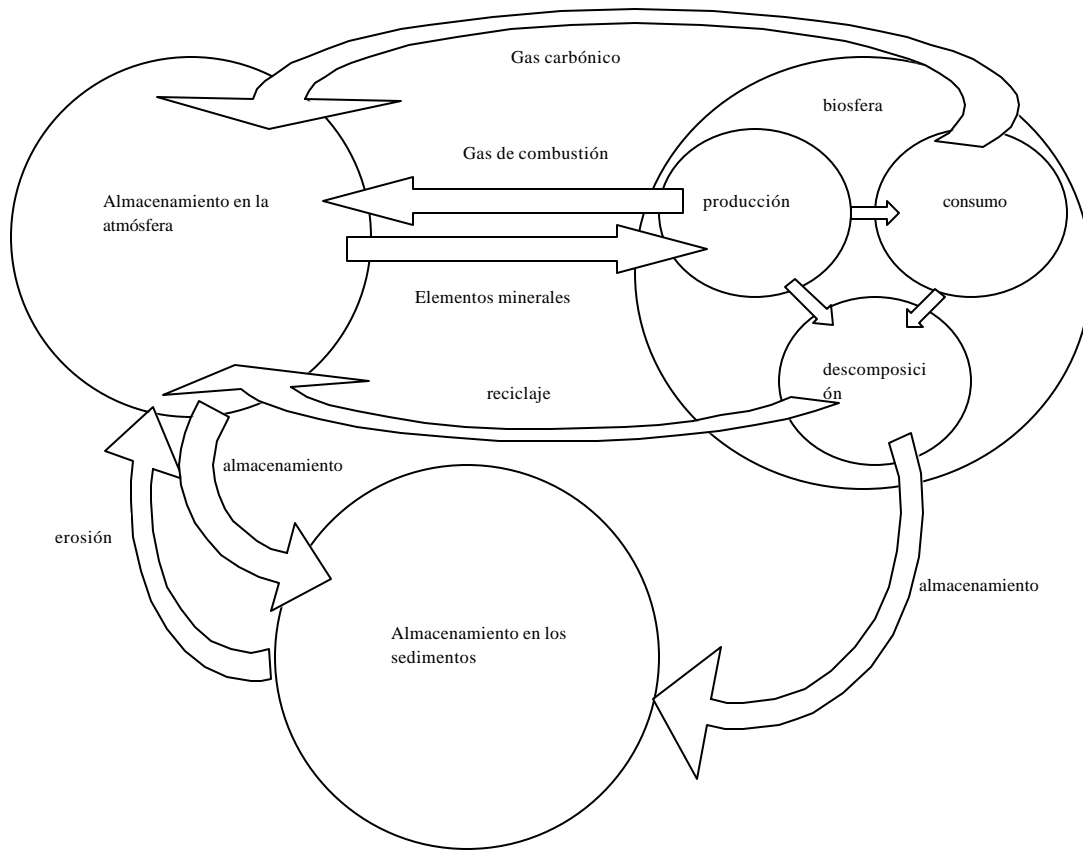
Las moléculas orgánicas que componen los excrementos, la orina, los tejidos en descomposición y todos los despojos desagradables son fraccionados por los descomponedores en trozos más pequeños y más simples. Este troceo molecular conduce, al otro extremo de la cadena, a gas carbónico y a agua, residuos últimos de la descomposición de la materia orgánica.

Esta descomposición completa se realiza, por ejemplo, en ambiente, rico en oxígeno, de un bosque; en un suelo aireado por los insectos o penetrado por los gusanos de tierra. Los residuos imposibles de romper forman el humus. Los elementos minerales, nitrógeno, azufre, fósforo, son totalmente regenerados. Durante este proceso los descomponedores también respiran. Envían gas carbónico y desprenden importantes cantidades de calor. Es fácil darse cuenta de ellos en las proximidades de un montón de mantillo o de estiércol.

Este troceo de moléculas puede asimismo realizarse en ausencia de oxígeno: en el fondo de un lago, en el cieno de los pantanos o dentro de un cadáver. La descomposición es incompleta y la combustión se realiza muy lentamente, liberando menos energía: es la *fermentación*. Los residuos incompletamente quemados se acumulan en el medio, confiriéndole el peculiar olor de las materias en descomposición, como sucede, por ejemplo, en la vecindad de los pantanos. Las materias orgánicas de estos suelos tan ricos se incorporan poco a poco a los sedimentos. Este es el origen de la turba, del carbón y, por supuesto, del petróleo.

Los nitratos, sulfatos, fosfatos, incorporados a los sedimentos como consecuencia de la acción de los descomponedores, pueden liberarse gracias a la erosión de las rocas por el viento, el hielo o la lluvia, y solubilizarse por el agua de torrentera. Son reinyectados en la cadena alimentaria al nivel de las raíces de las plantas y la abandonan en la orina de los animales (sobre todo el nitrógeno) o en sus excrementos (azufre y fósforo).

Este reciclaje de los materiales de la vida se producen alternativamente una fase orgánica y en una fase inorgánica; sedimentaria (reserva de sedimentos) o atmosférica (reserva de la atmósfera). Debido a esta alternación y al acoplamiento de los ciclos atmosféricos, geológicos y biológicos, los grandes ciclos que mantienen el ecosistema se denominan *ciclos biogeoquímicos*.



El esquema anterior resume las fases principales del ciclo general de los elementos químicos del ecosistema (carbono, nitrógeno, azufre y fósforo). Pone de manifiesto la circulación de los elementos químicos entre los principales depósitos. Puede aplicarse a todos los elementos, si bien determinados ciclos presentan una fase predominante en el depósito atmosférico o, por el contrario, como ocurre con el fósforo, en el depósito sedimentario. A la derecha del esquema se encuentra la fase orgánica descrita más arriba.

La regulación y el mantenimiento de los equilibrios

El funcionamiento del ecosistema no se ciñe al empleo del flujo irreversible de la energía solar y a los ciclos de producción, almacenamiento, consumo y regeneración de los materiales de la vida. Existe una tercera propiedad tan importante como las anteriores: la regulación del buen funcionamiento del conjunto.

Los ciclos biogeoquímicos son autorregulados: una variación demasiado brusca en una dirección es bien compensada sucesivamente por la modificación de otra variable, resultando en el efecto global de devolver el equilibrio al sistema. Toda actividad realizada en el ecosistema tiene una respuesta como contrapartida. Cada interacción, cada intercambio, por mínimo que sea, representa potencialmente un mecanismo de regulación. El conjunto de tales mecanismos mantiene la comunidad en un <equilibrio dinámico>. A lo largo de cada cadena alimentaria, red o ciclos están interconectados, coordinados y sincronizados en el conjunto superior que constituyen los grandes ciclos biogeoquímicos.

Los materiales fluyen de productores a consumidores y luego a descomponedores y entre los distintos reservorios, sin que se den estrangulamientos ni penurias, y mientras que la descomposición química de los grandes reservorios de la atmósfera y de los océanos se mantiene entre límites muy estrictos. En esto se asemeja el ecosistema a un organismo vivo: al igual que el organismo, “sabe” conservar los equilibrios de su medio interior.

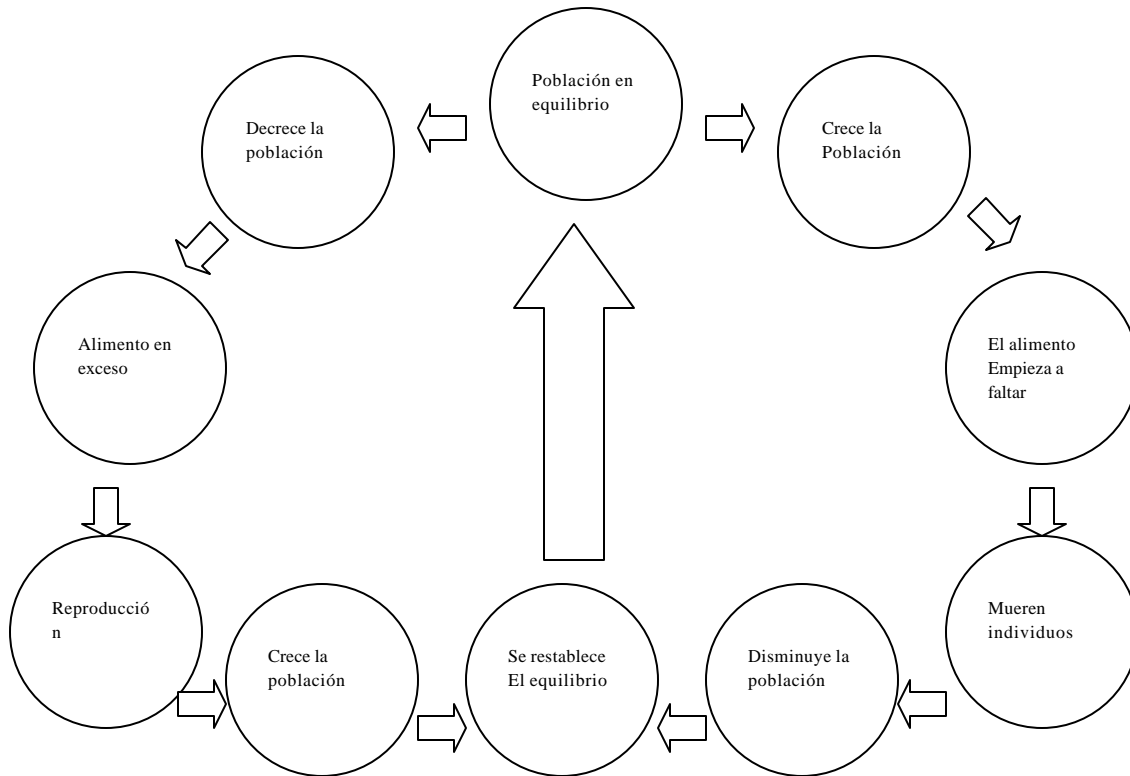
Pero ¿cómo se realiza esta regulación?

Los elementos minerales u orgánicos que pasan de un grupo a otro actúan como *activadores* o como *inhibidores* sobre el funcionamiento de la máquina de producir o de consumir. Si uno de los ciclos se frena (a causa, por ejemplo, de la desaparición de un cierto número de agentes consumidores), las cantidades acopiadas crecen rápidamente. Dado que la velocidad de los flujos de materia y de energía que se desplazan en los ciclos es proporcional a las cantidades almacenadas, el sistema se autoequilibra eliminando más deprisa el exceso.

La circulación del agua y la actividad de los animales desempeñan un papel muy importante en estos mecanismos de regulación. El agua transporta los elementos minerales nutricios hasta las raíces de las plantas. El agua de torrentera erosiona los sedimentos y acelera su reincorporación a los ciclos del ecosistema. La evaporación y la transpiración de las plantas y de los animales juegan un papel esencial en la regulación térmica de los organismos y en el control del contenido de la atmósfera en vapor de agua.

En cuanto a los animales, su insaciable demanda de alimento, por la que buscan, acosan y consumen a otros organismos, contribuyen a devolver a las plantas un flujo regular de sustancias minerales a cambio de ese alimento. Es decir, los consumidores <trabajan> para los productores, y recíprocamente, viéndose cada uno recompensando por los elementos minerales o por los alimentos que el otro grupo retorna. Si la población de un determinado tipo de consumidores crece demasiado deprisa, se desajusta el equilibrio y el alimento llega a faltar: muere cierta cantidad de individuos y esto restablece el nivel de población óptimo en relación con el medio en el que vive esa comunidad.

La regulación del volumen de una población dada se establece, pues en la lucha por la obtención del alimento disponible y en la mortalidad que se ceba en las especies demasiado abundantes respecto a los limitados recursos alimentarios. Dicho mecanismo de regulación puede ser ilustrado por el esquema siguiente, que utilizaré a menudo, más adelante, en relación con la economía y la biología.



La memoria del ecosistema: sus grandes depósitos

Ciertas reacciones de reajuste del equilibrio pueden ser rápidas, otras extraordinariamente lentas. Ha podido medirse, con ayuda de elementos radioactivos, la velocidad a la que un elemento mineral, como el fósforo, atraviesa el ciclo orgánico, es decir, pasa de organismo en organismo, de estructura química en estructura química, desde su ingreso en la cadena alimentaria hasta su retorno al mundo mineral. Este tiempo completo de *turnover* (reciclaje), dependiente de las estaciones, ha podido ser evaluado en el caso de un lago en diez minutos solamente

en verano y en más de diez horas en invierno. Por el contrario, en la fase sedimentaria la duración del almacenamiento y de liberación del fósforo puede ascender a doscientos años.

Los tres grandes depósitos de la atmósfera, de la hidrosfera y de los sedimentos desempeñan también un papel regulador sobre el conjunto del ecosistema, limitando sus variaciones demasiado bruscas. Actúan por <efecto cisterna> y reducen las oscilaciones debidas a variaciones cíclicas. Así es como la importante concentración de los océanos en iones carbonatos permite mantener casi constante la concentración del gas carbónico en la atmósfera. Análogamente, la interacción de atmósfera y sedimentos permite regular la concentración de oxígeno en la atmósfera, concentración que se ha mantenido, de forma notable, en el 21 por 100 a lo largo de los últimos centenares de millones de años (estando constituido el resto de la atmósfera por un 78 por 100 nitrógeno y gases raros). La fotosíntesis produce tantas moléculas de oxígeno como consume la respiración.

¿Cómo ha podido el oxígeno acumularse en la atmósfera y mantenerse en el 21 por 100 de su composición? Sencillamente, por que una parte de la materia orgánica fabricada por la fotosíntesis es puesta en reserva, al abrigo de toda oxidación, en sedimentos profundos. Permanece, pues, constantemente un excedente de oxígeno. Es así como el almacenamiento constituye un medio particularmente eficaz de regular la concentración de oxígeno en la atmósfera.

Análogamente, la regulación tiene periodos de tiempo muchos más dilatados. En efecto, los sedimentos marinos pueden hundirse profundamente en el magma, en razón de movimientos de las placas que sostienen los continentes, y transformarse, por cocción, en rocas y gas volcánicos. Además, las fosas oceánicas donde se acumulan los sedimentos (a una fosa de este tipo se le llama geosinclinal) se hunden paulatinamente bajo el peso de lo mismo. Estas fosas podrán dar lugar al nacimiento de cadenas montañosas, en cuyo momento los materiales en ellas encerradas serán violentamente expulsados hacia la superficie bajo el efecto de las enormes presiones generadas. Con la colaboración del viento y de la lluvia, compuestos minerales que parecían perdidos para el ecosistema vuelven a él tras un rodeo de varios millones de años.

Gracias a estos mecanismos de regulación entre el mundo mineral y la biosfera, que ponen en juego tiempos de respuesta muy diversos, desde el minuto a los millones de años, mantiene el ecosistema su estructura y el conjunto de sus funciones.

2. La economía

Más allá de la macroeconomía

En el ecosistema ideal que se ha descrito faltaba evidentemente el hombre. Este nuevo habitante del planeta, por su agricultura, su industria, su economía, ha modifica poco a poco equilibrios que existían muy anteriormente a él. Todo sucede como si un nuevo organismo (la sociedad humana) se desarrollara y creciera en el seno del primero. Como un parásito drenando para sí la energía y los recursos de aquél a quien invade y al que, quizá acabará por matar. ¿Qué herramienta ha podido proveer al hombre de tales poderes?

Ninguna en particular, sino un conjunto de medios que la permiten producir y distribuir bienes en cantidad siempre creciente, a una escala cada día más amplia. Este conjunto de medios es lo que constituye el objeto de estudio de la economía.

Para observar al macroscopio el funcionamiento global de la máquina económica se necesita adoptar el punto de vista del <naturalista> y situarse a un nivel aun más elevado de lo habitual en macroeconomía. Porque la economía se conecta a los grandes ciclos ecológicos, lo que, durante largo tiempo, se ha olvidado o ignorado. Cuando la economía se acelera o se desboca, exige más energía, materiales, informaciones; arroja también más desechos al medio natural.

Tal punto de vista podría parecer que conduciría a una interpretación ingenua de los mecanismos económicos, si no se guardase constantemente en mente que, tras el desarrollo de los flujos o el movimiento de los ciclos, hay *centros de decisión*. En definitiva, es en medio de los conflictos, de las relaciones de fuerza, de los arbitrajes, de la búsqueda de poder y de la dominación de un cierto grupo sobre otro, donde es preciso situar el funcionamiento de la máquina económica. Es obvio que ese enfoque habría llevado a desbordar el marco que me había fijado. Tampoco se trata de describir un tipo particular de sistema económico (tomando aquí <sistema> en su sentido político); sino más bien de poner de manifiesto, como para el ecosistema, la dinámica del conjunto, el funcionamiento general de la máquina económica, cualquiera que sea el sistema al que pueda pertenecer.

La “regla de gobierno de una casa”

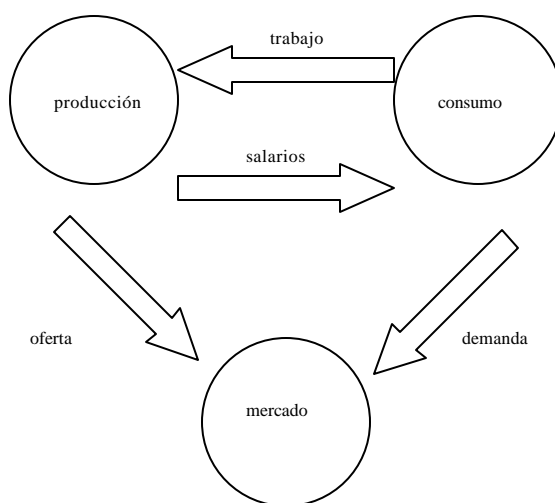
La palabra economía toma su significado de las mismas raíces que la palabra ecología. La economía (de *oikos*, casa, y *nomos*, regla) es, literalmente, la <regla de gobierno de una casa>. Pero también es, por extensión, el arte de gestionar bienes correctamente; y, en acepción restringida, de gestionar bienes evitando gastos inútiles, esto es, haciendo “economías”.

De la casa se ha extendido la actividad al Estado (economía política) y a la sociedad en su conjunto. En sentido amplio, la función económica de la sociedad humana resulta así la producción de bienes para satisfacer las necesidades de los hombres. La escasez misma de estos bienes y las dificultades de su producción implican limitaciones, un racionamiento que la humanidad trata de reducir. Se llega de esta forma a la definición célebre de L. ROBBINS: “la economía es el

comportamiento del estudio humano como relación entre fines y medios escasos que tienen usos mutuamente exclusivos”.

Este tipo de definición empobrece considerablemente tanto al función económica como el papel del hombre (productor y consumidor), motivado, según parece, por el solo deseo de satisfacer sus necesidades. Así queda reducida la economía, en opinión de FRANCOIS PERROUX, a una <ciencia de los medios> siendo los fines el dominio de la moral o de la política. Se asimila la economía el funcionamiento de un mercado donde reinaría una competencia pura y perfecta. El *homo oeconomicus* aparece como un ser vacío y sin alma, impulsando por móviles rudimentarios y capaz, apenas, de adaptarse pasivamente a las “fuerzas” del mercado. (RENE PASSET).

Este empobrecimiento de la función económica aparece netamente en cuanto se observa un poco los esquemas clásicos de los circuitos económicos.



¿Qué se ve? Un equilibrio de fuerzas entre la oferta y la demanda, un flujo de bienes y de servicios, un flujo de dinero. Pero es una máquina que, de hecho, parece agarrotada, capaz sólo de funcionar a golpes, en un universo irreal del que se ha excluido a la naturaleza. La máquina económica funciona <entre paréntesis>, sin que se ponga de manifiesto el flujo irreversible de energía que obligatoriamente resulta degradado para producir un trabajo.

La economía es, también, una “ciencia de lo vivo”. Para hacer resaltar la estrecha conexión entre el ecosistema y el sistema económico me gustaría antes trazar, apoyándome en una serie de esquemas, una breve historia de la economía tomada en su más amplia acepción, es decir, como <el estudio de los mecanismos de producción, de interdependencias entre estos mecanismos y esta estructura>.

Desde el nómada a la empresa: la pequeña historia de la economía

Las grandes fases del desarrollo de la función económica coinciden con el empleo de medios nuevos que permiten al hombre actuar cada día más eficazmente sobre su medio. El fuego, la agricultura, la artesanía y el perfeccionamiento de las herramientas; el advenimiento de la máquina de vapor, la masiva utilización de los combustibles fósiles, son otras tantas etapas señaladas que han concretado la dominación del hombre sobre la naturaleza, etapas que no han sido franqueadas todas por el conjunto de la humanidad. Preciso es considerar estas “economías” sucesivas como extendidas en el tiempo, pero coexistentes hoy en la superficie de nuestro planeta.

La *primera etapa* se caracteriza por la conquista y el dominio del fuego. El hombre vive de forma nómada, desplazándose de continuo en busca de alimento y de abrigo. La función esencial que suma es la de su propia supervivencia, siendo su actividad primordial la de reunir alimentos dispersos en el entorno, gracias a la caza, la pesca o la cosecha. Obtiene así las calorías para mantener su actividad y asegurar su subsistencia. Tal actividad exige cantidades importantes de energía (desplazamientos, luchas esfuerzos). A este cazador nómada le resulta por ello imposible acopiar suficiente energía y saber-hacer (es decir, constituir un “capital” energético o de saber) para acelerar su desarrollo.

La *segunda etapa* se materializa por “domesticación” de la energía solar gracias al dominio de la agricultura, y por la domesticación de los animales, fuentes importantes de energía. Esta etapa, que se desarrolló hace unos dos mil años, ve al hombre establecerse en zonas abrigadas y fértiles. En adelante puede almacenar grano, acumular energía y utilizar este excedente energético en otras actividades. Desde entonces produce, gracias a la energía solar, el alimento que asegura su supervivencia y se sirve de la energía animal para accionar máquinas rudimentarias y desplazarse.

La *tercera etapa* ve la aparición de herramientas más perfeccionadas, la concentración del trabajo en las ciudades y la aparición de los gremios y talleres, que permiten el desarrollo a gran escala del artesanado. La cantidad y diversidad de objetos fabricados por los artesanos se hacen suficientemente grandes como para servir de base al desarrollo del trueque. Se cambian, gracias a acuerdos minuciosamente especificados, un objeto por alimentos, un animal por una serie de objetos, etc. Los acuerdos de trueque permiten equilibrar los flujos de objetos fabricados con los flujos de productos consumidos, realizándose tal equilibrio por medio de una zona de intercambio: el mercado.

A partir de entonces, el hombre asegura no sólo su subsistencia, sino que participa, como creador y como consumidor de bienes, en proceso de producción, de intercambio y de consumo que hace intervenir numerosas dimensiones de su

naturaleza: arte, dominio de herramienta, enseñanza de su saber-hacer, placer de la creación o, simplemente, de la acumulación de bienes materiales.

La *cuarta etapa* es la de la era preindustrial. Las herramientas perfeccionadas del artesano, que permitían manufacturar objetos simples de funciones precisas, dejan sitio a máquinas accionadas por los elementos naturales, por la energía humana o animal, y conducentes a una aceleración de las cadencias de producción. La densidad de habitación y las posibilidades de intercambio obtenibles en las aglomeraciones urbanas permiten la división del trabajo y la prolongación del proceso de producción. Las actividades de los distintos productores se ven así imbricadas en cadenas y redes interdependientes, orientadas a la fabricación por fases de objetos complicados.

El empleo a gran escala del dinero y las nuevas formas de intercambio resultantes revolucionan la economía: el dinero hace estallar, en el espacio y en el tiempo, el trabajo, el intercambio, el consumo y el ahorro. Una hora de trabajo efectuada aquí puede trocarse en otro lugar. En otro momento, por dinero recién ganado o almacenado desde hace tiempo. Pero, asimismo, se inician, se esfuerzan y se equilibran los dos grandes flujos complementarios sobre los que se asienta todo el funcionamiento de la máquina económica: el flujo de energía, de materiales y de informaciones que circula en una dirección, y el flujo de dinero (resultante de los intercambios y transacciones) que lo hace en sentido contrario al del flujo de energía.

La *quinta y última etapa*, la de la sociedad industrial moderna, se caracteriza por la utilización masiva de los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas), el desmenuzamiento del trabajo en una multitud de tareas simples, aunque casi siempre desprovistas de valor creativo, y la producción masiva de desechos no reciclables por el ecosistema. Esta división del trabajo, necesaria de cara a la eficacia, implica el reagrupamiento de los trabajadores en células de producción: las empresas.

La aceleración de la máquina económica, exigida por el crecimiento, lleva a un aumento de la producción y a un aumento de consumo. La acumulación de capital (material y financiero) y la acumulación de capital-saber (técnicas, saber-hacer) ejercen un efecto catalítico sobre la aceleración del crecimiento. Pero la complejidad de la producción exige un nivel de educación, siempre incrementado, para aquellos que conciben, controlan o sirven de máquina industrial.

Me apoyaré en el esquema de la página siguiente para describir las líneas maestras del funcionamiento de la máquina económica. Este funcionamiento puede comprenderse mejor en su conjunto si se sigue un plan análogo al que se ha utilizado para el ecosistema: descripción de los grandes ciclos y de los principales flujos (energía y dinero); papel de los diversos agentes económicos que aseguran las funciones de producción y de consumo, malfuncionamiento de la economía y tentativos de regulación.

¿Qué es lo que hace girar la máquina económica?

Los modelos clásicos consideran la máquina económica como un *sistema cerrado sobre sí mismo*, cuando, en realidad, es un *sistema abierto al entorno*, sujeto a las leyes de la energética. Para que haya producción de trabajo es necesario que “fluya” energía, o sea, que se degrade en calor irrecuperable como consecuencia de una caída de potencial desde una fuente caliente a un sumidero frío.

El esquema anterior ilustra tal caída de energía. El flujo irreversible que atraviesa el sistema económico le entra por arriba y a la izquierda del bloque que figura la producción, circula en forma de bienes, servicios y trabajo y sale como calor irrecuperable y desechos no reciclados, es decir, como entropía.

Puede uno preguntarse en que sentido los bienes y servicios constituyen un flujo de energía. De hecho, los bienes materiales, los <productos>, son el resultado de transformaciones que hacen intervenir energía, información y materias primas. Se los puede considerar como *materia informada*; materia que ha recibido una forma particular, que ha sido “informada” por causa de la actividad humana.

Ahora bien, la materia es energía condensada; y las informaciones, una forma de energía potencial. Los bienes (incluso los alimentos) y los servicios son, entonces, equivalente a un flujo de energía. A cada bien, como se verá en la página 138, se asocia un <coste energético>, en kilocalorías por ejemplo. En cuanto al bucle de retorno de la energía en forma de trabajo, se expresa fácilmente en kilocalorías gastadas por hora trabajada o en cualquier otra unidad adecuada de tiempo.

Pero existe otro flujo acoplado al primero: el flujo monetario. Fluye en *sentido inverso* al de energía. En efecto, contra horas de trabajo, informaciones o calorías se cambian unidades monetarias. El flujo de energía y el flujo de dinero se equilibran y regulan por intermedio de <detectores> (mostradores, ventanillas, transacciones de todas clases), capaces de medir y equilibrar la velocidad e los flujos en un sentido o el otro. Lo que posibilita estos intercambios es un sistema de precios y de valores aceptado por todos y base común de comparación y transacción. Como dicen los economistas, de manera bien poética, el valor de un bien o de un servicio se establece en la “convergencia de la escasez y del deseo”. El precio será la expresión de este valor de cambio: un “valorímetro” de uso particularmente cómodo, pero esencial en el funcionamiento y en la regulación de la máquina económica.

El flujo monetario permite los intercambios disociando el trueque en dos etapas: cada cual puede vender lo que posee a cambio de dinero (su tiempo, por ejemplo); y, en una segunda etapa, comprar con ese dinero los bienes o servicios que desea. El dinero actúa como el lubricante de la máquina económica o, de una

manera metafórica, como un rodamiento a cojinetes: cada cojinete gira, en el punto de contacto, en dirección opuesta a la del flujo de energía o de trabajo.

Pero la velocidad de circulación del dinero, la intensidad de su flujo, dependen de las fuerzas empleadas por los principales actores de la vida económica: se les llama *agentes económicos*.

Los agentes económicos: centros de decisión

Los dos principales agentes económicos son *los productores* y *los consumidores* (que se llaman también las <empresas> y los <hogares> en los libros de economía). Con vistas a la simplificación, son estos únicos que figuran en el esquema. Los otros son los *organismos financieros* (bancos), las *administraciones* (el Estado) y el *exterior* (el extranjero). Aunque no figuran explícitamente en el esquema será subrayado su papel. Estos diferentes agentes económicos actúan como centros de decisión, practican elecciones y ejercen poderes, traducibles en fuerzas capaces de controlar, canalizar y orientar los flujos de energía y de dinero circulantes en el sistema económico.

Los productores y los consumidores

El hombre es, al *mismo tiempo*, productor (en la empresa) y consumidor (en un mercado). Recordemos que esas dos funciones eran materializadas por organismos muy diferentes en el ecosistema (las plantas verdes y los animales).

Pero el hombre es mucho más que un simple productor o consumidor. ¿Qué papel se le adjudica en economía bajo el nombre de <hogares>?

- Por su trabajo en las empresas es productor de bienes y de servicios. A cambio de este trabajo recibe un salario y rentas que permiten asegurar la función de consumo, esto es, en la óptica de la teoría económica clásica, acumular bienes y servicios para satisfacer sus necesidades. Por último, tiene la posibilidad de almacenar dinero, mediante el ahorro, y constituirse en capital.
- Más, ante todo, el hombre es creador. Inventa, crea informaciones, saber, obras de arte, nuevos modos de vida y de pensamiento... Asimismo, puede almacenar conocimiento o ideas, y constituir un <capital-saber>.

La función de producción de bienes y servicios está asegurada por las *empresas*. En el esquema de la página 28 se muestra la complementariedad de las funciones de producción y de consumo. Siguiendo las flechas, veamos qué entra en el bloque <producción> y qué sale de él. A la entrada: un flujo de energía y de materias primas (o de productos semiacabados), trabajo, capital, saber-hacer e ingresos procedentes del producto de las ventas. A la *salida*: un flujo de bienes

y de servicios, salarios, innovaciones, reservas transferidas a los bancos para su almacenamiento, desechos y calor uirrecuperable.

Si seguimos ahora, sobre el mismo esquema, las flechas indicadoras en relación con el bloque <consumo>, se ve a la entrada un flujo de bienes y de servicios, salarios, intereses del ahorro, educación. A la salida: trabajo, gastos, dinero puesto en reserva (ahorro), informaciones nuevas (creaciones, invenciones) y desechos.

Los productores y los consumidores tienen la posibilidad de almacenar en dos grandes reservas, ya dinero (producto de un trabajo presente o pasado): es la creación de capital; ya conocimiento: es la creación del <capital-saber>.

La regulación de los flujos de energía y de dineros se efectúa, en parte, al nivel del emrcado de empleo y al nivel del mercado de bienes y servicios.

Las otras tres categorías de agentes económicos no figuran en el esquema, para no complicarlo. Sin embargo, su papel es muy importante, tanto por la regulación del conjunto como po las perturbaciones exteriores que ùeden introducir en el sistema económico.

Los *organismos financieros*, y sobre todo los bancos, juegan un papel <cisterna> por el hecho de la dimensión misma de las <reservas> que representan. Por medio del crédito a las empresas y a los particulares (lo que no es más que un intercambio diluido en el tiempo), por las inversiones, por los depósitos de los ahorradores, por la emisión de dinero, los bancos modulan la actividad económica controlando la velocidad de desplazamiento en los flujos de dinero y la importancia de los stocks acumulados. Este cpmnstante ajuste de la masa monetaria en circulación permite (en teoría) asegurar el equilibrio entre oferta y la demanda en el mercado de bienes y servicios.

Las *administraciones* dependen de los poderes públicos y están, por consiguiente, bajo control directo del Estado; juegan también un papel esencial en la regulación de la máquina económica. Por la vía del presupuesto y del plan, pero igualmente por las compras directas del Estado, por los impuestos y las tasas, por las subvenciones, por el control de las reglas de la concurrencia, por la fijación y el bloqueo de los precios, por las restricciones crediticias, por las medidas a favor de las exportaciones, o por la devaluación de la moneda, por no citar más que algunos ejemplos entre los más conocidos.

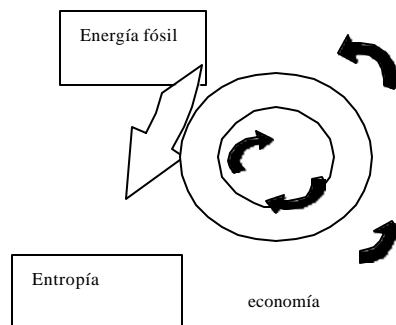
El *exterior* es el resto del mundo, todo aquello que se sitúa allende las fronteras de un Estado. Este Estado vende (exporta) y compra al extranjero (importa) bienes y servicios. El resultado de las exportaciones menos el resultado de las importaciones constituye la balanza comercial, cuyo papel se verá al abordar la regulación de la máquina económica. A su vez, el <exterior> actúa

también por medio de perturbaciones, con frecuencia difícilmente previsibles, sobre el conjunto de la economía de una nación: crisis políticas, devaluaciones o alzas en el tipo de cambio, aumento del precio de la energía o de las materias primas.

Las dificultades de regulación de la economía

Para hacer comprender las sacudidas y al regulación de la máquina económica, ésta puede ilustrarse por un modo de funcionamiento basado en la aceleración o frenada de los flujos monetario y energético, que se traducen por los bien conocidos síntomas de la inflación y de la recesión. Echaré mano de tres *indicadores* simples, los más ampliamente utilizados y que permiten medir los efectos del control ejercido por los poderes públicos o los organismos financieros sobre la máquina económica, cuando se embala o se agarrota. Se trata de los *precios*, del *empleo* y de la *balanza comercial*.

Una observación previa: el acoplamiento entre el flujo de energía y el flujo de dinero puede compararse, muy toscamente, al acoplamiento entre dos engranajes, uno situado *en el interior* del otro.

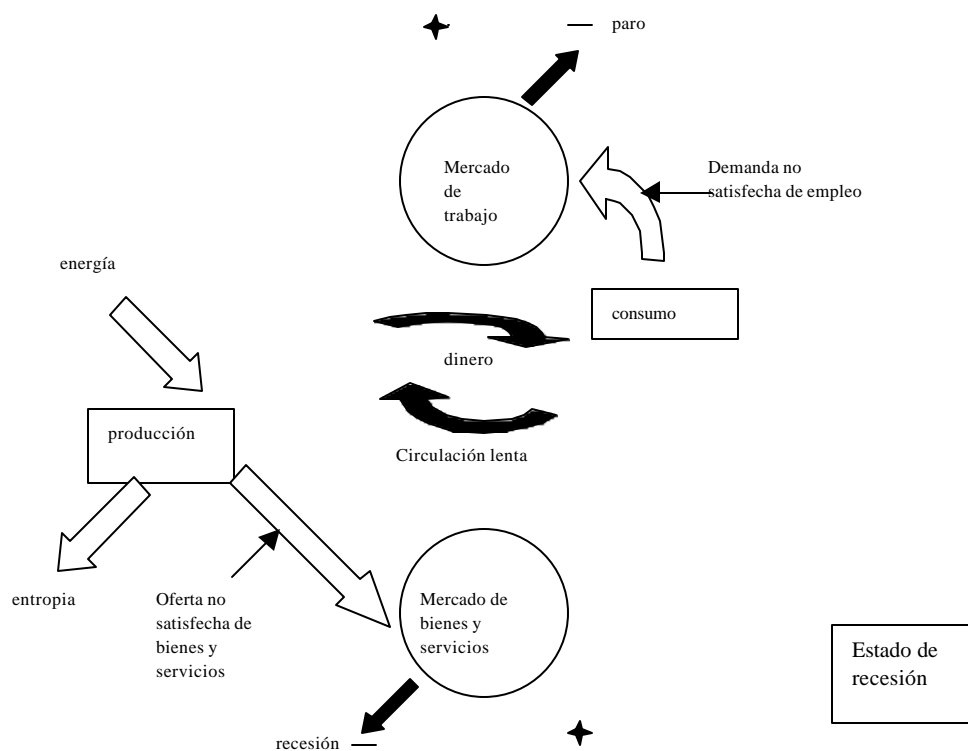


El engranaje externo se mueve por la <caída> de energía que se degrada en la máquina económica. Arrastra el engranaje interno por intermedio de una serie de

* Sin discutir aquí las numerosas causas que los provocan y cuyo análisis desborda tanto mis competencias como los fines de este capítulo

rodamientos. Este engranaje puede, a su vez, verse frenado o acelerado y, consiguientemente, dificultar o facilitar el movimiento del engranaje exterior. Modelo tan rudimentario va a servir para ilustrar diferentes aspectos de las recesión y de la inflación.

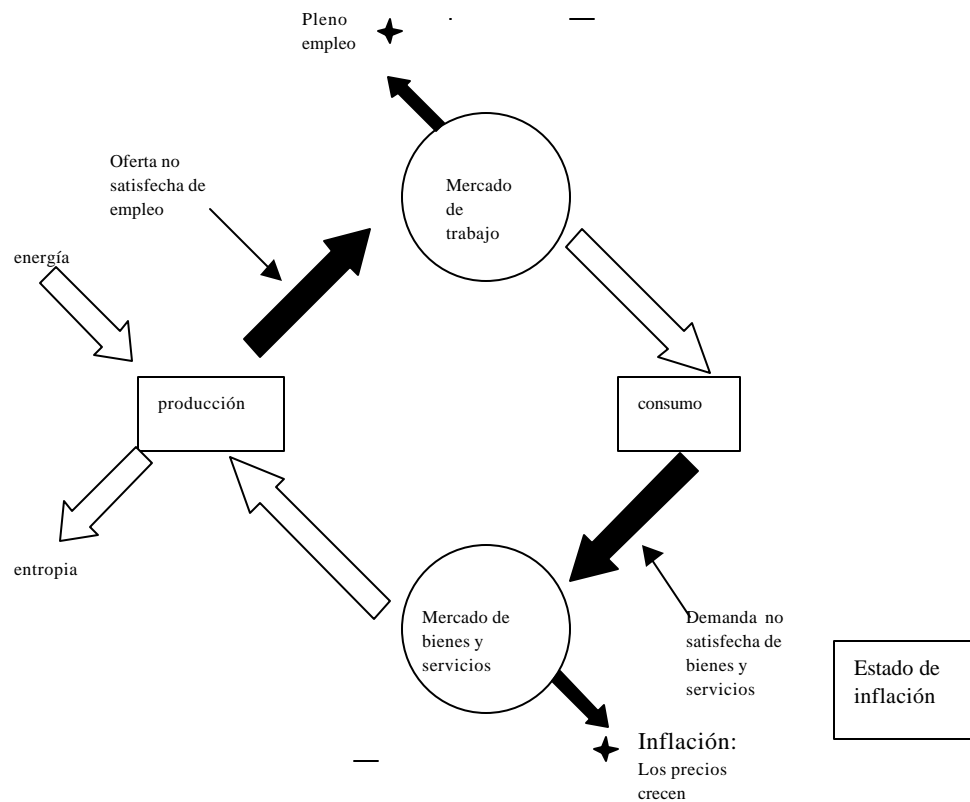
La *recesión* se caracteriza por el frenado del flujo del dinero relativamente al de energía (en el conjunto anterior el engranaje interno se frena y contribuye a disminuir el ritmo del engranaje externo). Si la masa monetaria disminuye (lo que equivaldría, por ejemplo, a suprimir rodamientos) los intercambios se hacen más difíciles. La fricción aumenta, la <viscosidad> del mercado se eleva. Aparecen localmente excesos, desbordamientos en el flujo de energía: al nivel del mercado del empleo (demanda no satisfecha, por ser superior a la oferta) y, al nivel del mercado de bienes y servicios (oferta no satisfecha, por ser superior a la demanda).



Hay progresivamente menos dinero con respecto a los bienes ofertados en el mercado. Ello se traduce por una baja de precios, una caída de la producción, un acrecimiento del paro. En período de baja, los consumidores prefieren esperar antes que gastar su dinero, lo que disminuye aún más la demanda y reduce todavía más el

flujo de dinero,. Se crea un círculo vicioso, una espiral recesiva que puede desembocar en la detención de la máquina económica; de la que se derivan las peores consecuencias para la vida de la nación y de los individuos.

La *inflación* se caracteriza por una velocidad acrecida del flujo monetario en relación con el flujo de energía; por una <fluidez> elevada de los intercambios. (El movimiento propio del engranaje interno contribuye a acelerar el del lenguaje externo, en cierta manera como si se hubiesen añadido rodamientos.) El mismo efecto se obtiene cuando se reduce el flujo de energía. Es lo que sucede cuando la energía escasea o se encarece.



La masa monetaria en circulación crece, así como su velocidad de desplazamiento. El dinero “quema en los bolsillos”. Su valor cae. El poder adquisitivo disminuye. Todo el mundo quiere comprar antes de las subidas.

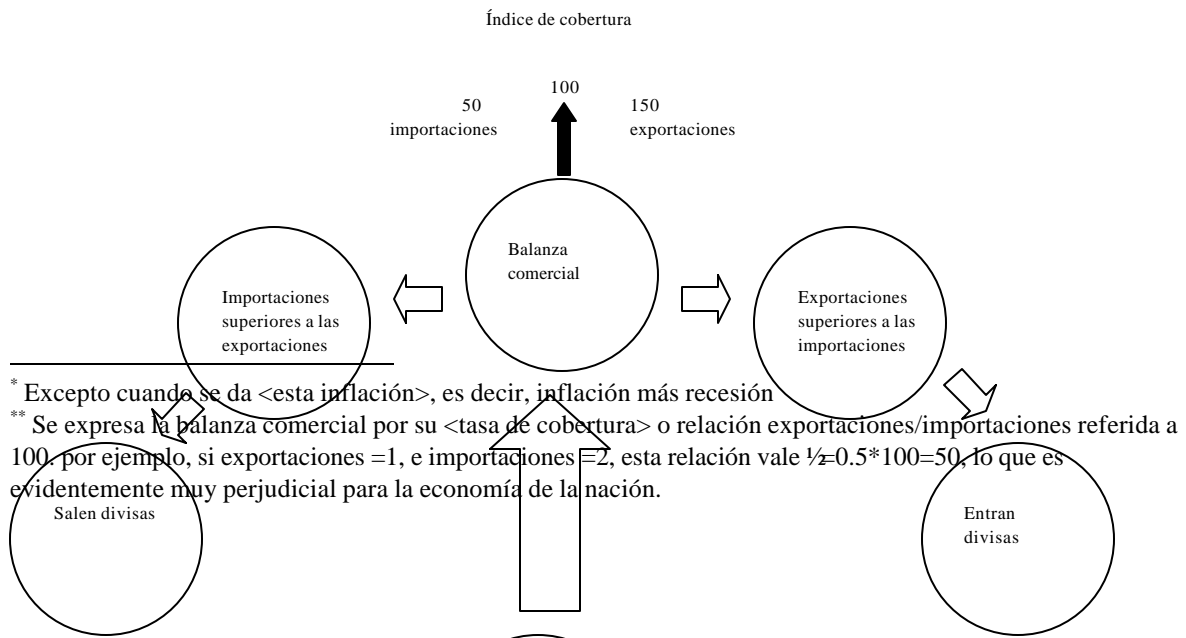
Los precios crecen, la producción aumenta para seguir a la demanda, pero con el aumento de los salarios se cargan los costes de producción, crecen más los precios, etc.

Se entra de nuevo en un círculo vicioso: una espiral inflacionista que ahora conduce, no a una detención, sino a un embalamiento incontrolado de la máquina, con las consecuentes tensiones y desigualdades sociales. Al girar más deprisa el flujo de dinero y arrastrar, con algún retraso, al flujo de energía, se generan sobrecalentamientos al nivel del mercado de trabajo y al nivel del mercado de bienes y servicios. La demanda de los consumidores es superior a la oferta de los productores, lo que se traduce en una constante escalada de los precios.

Resulta evidente que ambos efectos son peligrosos, aunque una ligera inflación sea favorable a la expansión y al pleno empleo. En efecto, la experiencia económica demuestra que parece existir una relación inversa entre inflación y paro, lo que plantea un dilema a los responsables de la política económica porque es, generalmente, en periodo de inflación cuando se mantiene el pleno empleo.

Al nivel de los intercambios con el exterior, la subida de los precios puede reducir las exportaciones y aumentar las importaciones, causando un fenómeno desequilibrador de la balanza comercial. Cuando los capitales huyen de un país cuya moneda pierde su valor, el movimiento se amplifica y puede conducir a la devaluación de la moneda. El siguiente esquema ilustra el papel del tercer indicador, la tasa de cobertura de la balanza comercial**

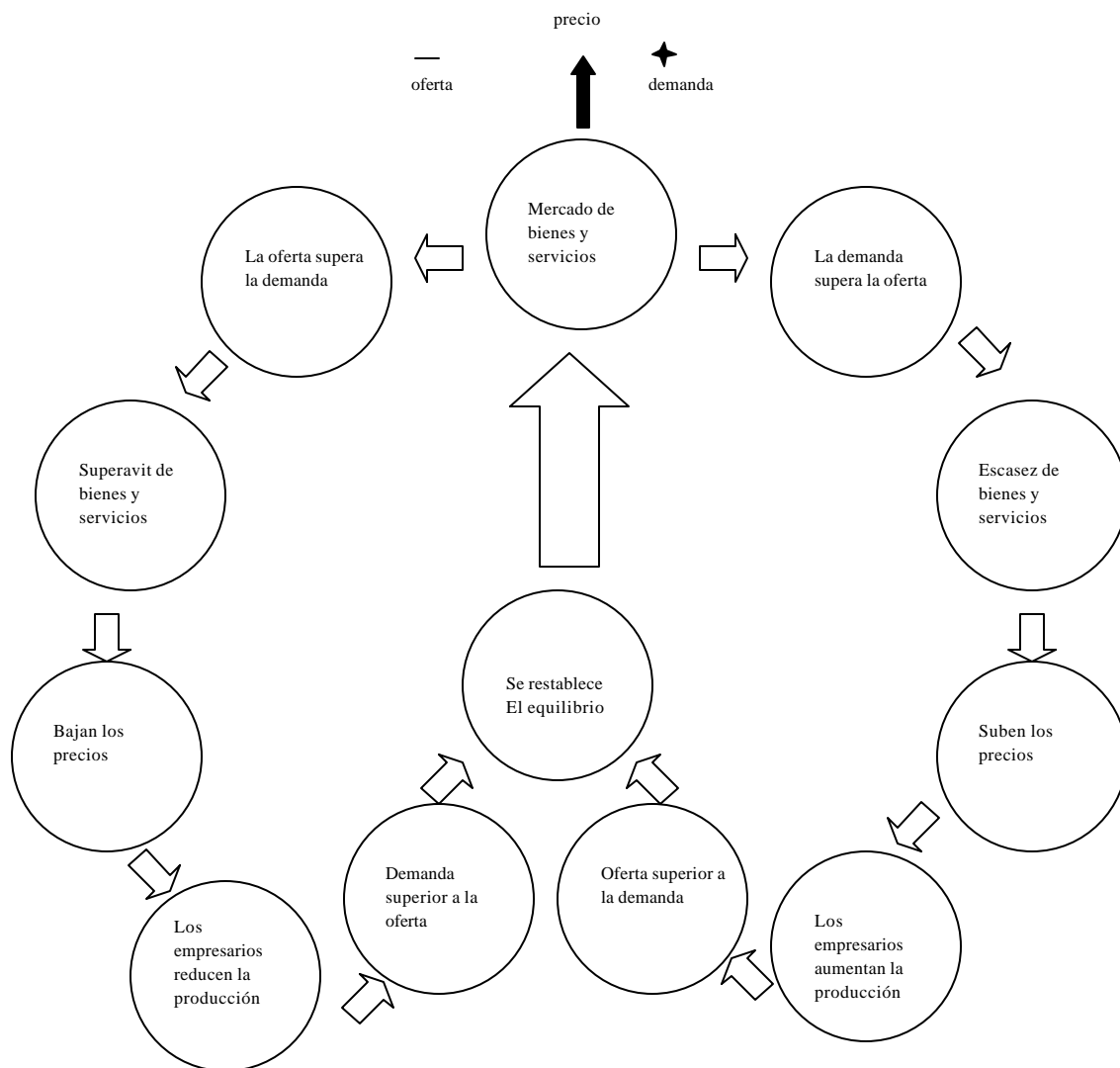
Los responsables de la política económica de una nación intentan obviamente mantenerse en la parte derecha del circuito, con una tasa de cobertura por encima de 100, lo que implica algunas restricciones: se mantiene una cierta inflación y, a pesar de los precios relativamente elevados, es preciso exportar. A escala mundial, el hecho de que todos los países quieran más de lo que importan desemboca naturalmente en tensiones y desigualdades.



La situación real es infinitamente más compleja que lo que se acaba de describir, y esto es lo que hace tan delicada la regulación de la economía *. Podría imaginarse, no obstante, que una especie de regulación automática por el mercado y por los precios, produciéndose en un régimen de libre competencia, habría permitido

* Ejemplo <esta inflación>

ajustar la oferta a la demanda. Esta regulación ideal está ilustrada por el siguiente esquema:



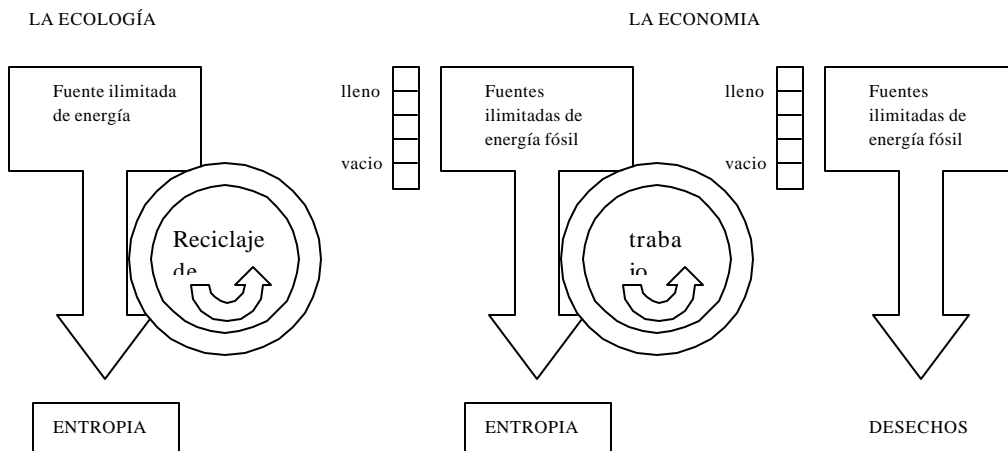
Un crecimiento de la demanda tiene por efecto aumentar los precios (los bienes se hacen más escasos). Los empresarios invierten y contratan personal para acrecentar la producción. Si la oferta de bienes y servicios resultante de este

aumento de producción sobrepasa la demanda de los consumidores, bajan los precios conduciendo esto a los empresarios a disminuir su producción, etc.

Por desgracia, la regulación automática del mercado por los precios no puede funcionar realmente. En régimen liberal, el consumidor debería ser <todopoderoso> y capaz de ejercer un <derecho de voto> permanente, representado por su libertad de comprar o no comprar un determinado producto, de boicotear o ed favorecer uno u otro sector de la economía. De hecho, por razón de las inversiones públicas y privadas que preceden a la demanda y orientan la producción, por razón del poder de la publicidad y de los monopolios constituidos por las grandes compañías multinacionales, o de la endeblez de las organizaciones de consumidores, ese <derecho de voto> no constituye una instancia real de regulación. A pesar de todo, los cambios de humor de los consumidores, el pánico o la voluntariedad de no consumir en un sector dado, pueden provocar oscilaciones perturbadoras del sistema económico.

Los bancos y el Estado actúan regulando la velocidad de los flujos y los índices de acopio de dinero. En período de inflación o de recesión, el Estado puede intervenir así al nivel de los precios (control, bloqueo), de los intercambios exteriores (barreras aduaneras, control de los cambios, devaluación), de los impuestos y de los salarios.

Pero les es especialmente difícil a los responsables de la política económica evitar las fluctuaciones cíclicas, el estacionamiento o las oscilaciones. Una de las soluciones escogidas por los países desarrollados desde el término de la Segunda Guerra Mundial es la de la política de crecimiento continuo: se mantiene deliberadamente un estado un estado de inflación con el fin de asegurar el pleno empleo, la rentabilidad de las inversiones, de hacer funcionar las fábricas y de aumentar el bienestar material de los individuos.



Desgraciadamente, todo tiene su precio: acelerar la máquina económica equivale a bombear más energía de un depósito que se vacía y a arrojar sobre el entorno aún más desechos y calor. La diferencia fundamental entre la máquina ecológica y la máquina económica resalta así en todo su rigor. El fundamento de lo ecológico y la máquina económica resalta así en todo su rigor. El fundamento de lo ecológico es un flujo irreversible de energía solar en cantidad *ilimitada* y un *reciclaje permanente* de los materiales. El fundamento de lo económico: un flujo irreversible de energía fósil procedente de una fuente *limitada*, y el desplazamiento irreversible de materiales procedentes de un depósito de recursos *no renovables*.

3. La ciudad

El lugar donde se enfrentan las leyes de la economía y las de la ecología es una estructura nueva en la historia del ecosistema, el nudo de una inmensa red de intercambios y de comunicación; una de las formas de organización entre las más complejas alcanzadas por el tejido social: la ciudad. Cerca ya del 50 por 100 de la población del globo vive y muere en ella. Para el año 2000, alrededor de un 80 por 100 de la humanidad vivirá y trabajará en asentamientos de más de 100.000 habitantes. La ciudad nace, se desarrolla, se diversifica y muere, también en ella. Transforma la energía, protege a los hombres facilita las comunicaciones. Para millones de seres humanos la ciudad alberga su lugar principal de trabajo: la empresa. El desarrollo de la empresa ha condicionado el crecimiento de la ciudad, y la ciudad ha reaccionado sobre ella modificándola profundamente. Como consecuencia de sus mutuos reajustes, de las condiciones particulares del trabajo y de mercado que han creado progresivamente, la ciudad y la empresa han generado limitaciones, modos de vida, aspiraciones nuevas. Pero se han insertado entre el hombre y la naturaleza como una suerte de medio biológico externo que algunas veces nos ahoga y a menudo nos aísla.

Para investigar cómo se conectan con el hombre y con el ecosistema, abramos ahora dos nuevas muñecas rusas: la ciudad y la empresa.

El nacimiento de las ciudades

La ciudad ha nacido de las necesidades de los hombres. Necesidades fisiológicas y utilitarias: protección, alimentación, salud, comunicación, intercambios. También necesidades psicológicas: necesidad de estimación de otros, del respeto, del ejercicio del poder, necesidad de educación.

La estructura de la ciudad actúa como un catalizador, acelerando el desarrollo de las ideas filosóficas y religiosas, de las ciencias y de las técnicas, de las artes y de los conceptos políticos. Organizando la multiplicación, la confortación, la

experiencia, pero también la sanción, este prodigioso centro de innovaciones atrae, valoriza o devalora hombres e ideas, como un torbenillo interminable.

Porque la ciudad es una máquina de comunicar; una inmensa red en cuyo seno la mayoría de las actividades persiguen la adquisición, el tratamiento y el intercambio de informaciones. Multiplicación de las comunicaciones y de los intercambios, aunque, sobre todo, pluralidad y diversidad de las opciones: para los empleadores, que disponen de una gama de talentos y especialidades; para los asalariados y consumidores, cuyas posibilidades de elección de un empleo o de un tipo de bienes o de servicios resultan diversificados, a veces con exceso.

La combinación de estos factores en el seno de la ciudad ha contribuido al desarrollo casi explosivo de las grandes metrópolis en el curso de este siglo. En 1850, había en el mundo cuatro ciudades de más de un millón de habitantes. En 1900 ya eran veinte y, cincuenta años después, ciento cuarenta.

Cada avance en una dirección repercute en otra, acelerando su propio desarrollo: descubrimientos científicos, productividad de las empresas, nuevos productos, medios de comunicación o de transportes; pero, asimismo, nuevas formas de vivir, reivindicaciones, limitaciones, conflictos, reajustes sociales. Así es como se teje, en la interdependencia de los factores, la complejidad orgánica de las ciudades.

Las primeras ciudades han nacido, hace unos cinco mil años, a partir de asentamientos situados en zonas fértiles propicias a las comunicaciones: el creciente fértil de la Mesopotamia, los valles del Nilo, de Indo y del río Amarillo. La fertilidad de la tierra ribereña permite la domesticación de la energía solar gracias a la agricultura. El acopio de los alimentos y de energía asegura el mantenimiento de la estructura compleja de las primeras ciudades, y la producción de excedentes energéticos permite la aceleración del desarrollo. La comunicación por los grandes ríos y en los deltas promueve el intercambio, el trueque, el comercio, favorece la confrontación de las culturas, cataliza la innovación técnica y social.

Hasta fecha bastante reciente, puesto que antes de 1850 no existía sociedad urbanizada, la gran mayoría de los habitantes de un país vive en aldeas. En ellas producen todo lo que necesitan. Partiendo de materiales brutos y de energía (alimentos, combustibles, maderas, textiles, cuero, principalmente), fabrican los bienes y los servicios útiles a la comunidad. El poblado asegura así su autoconservación.

En las primeras grandes ciudades viven las élites dirigentes, una minoría de un 20 por 100, compuesta de hombres políticos, religiosos, militares, nobles, burgueses y grandes comerciantes, que representa al resto de la población. Esta élite se mantiene hasta el fin del siglo XVIII gracias a los recursos y a la aportación

de energía representados por el trabajo de los aldeanos y la colecta de tasas e impuestos de toda clase.

En el siglo XIX, y al principio del XX, la revolución industrial y la división del trabajo traen la especialización. Los medios de comunicación a larga distancia (ferrocarril y telégrafo eléctrico) se combinan y se refuerzan atrayendo a las ciudades flujos crecientemente más densos de la población del país. El efecto autocatalítico, propio de las grandes aglomeraciones, se deja sentir a fondo. La fuerza de atracción que representan la libertad de elección, el nivel de los salarios, las posibilidades de distracción y de materiales de la periferia hacia las ciudades.

La metropoli moderna nace, pues, de la densidad de la población, de la extensión horizontal y vertical de las construcciones, de la organización de los medios de comunicación (automóvil, teléfono, ascensores) y de la creación de reglamentos y códigos para controlar las grandes funciones de las ciudades: regularidad de las horas de trabajo, reglamentación de la circulación, tentativas de regulación automática del tráfico por semáforos, etc. Pero, al mismo tiempo, se inician y mantienen oscilaciones cíclicas provocadas por las diarias migraciones de los trabajadores. La ciudad se transforma en una gigantesca bomba aspirante y expelente, llenando y vaciando alternativamente algunos de sus barrios según las horas del día o en el momento de los fines de semana.

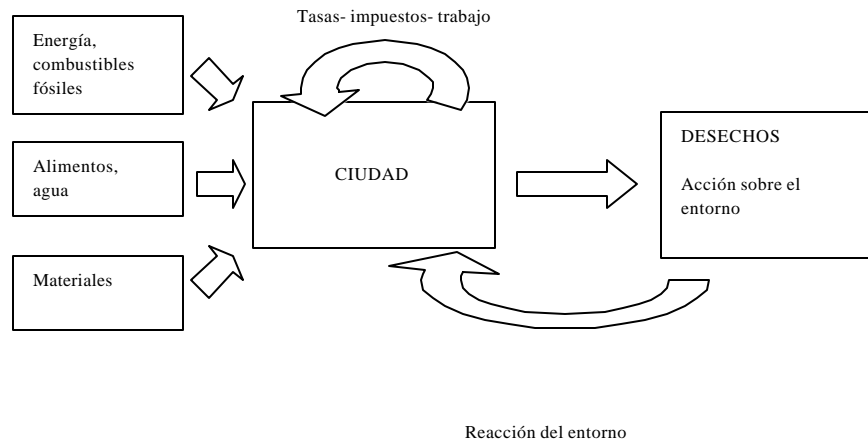
¿Es la ciudad un organismo vivo?

El crecimiento y las enfermedades de la ciudad, la multiplicidad de sus funciones, su comportamiento cotidiano, sugieren que la ciudad reacciona como un organismo vivo en comunicación con un entorno, al que modifica indirectamente y que, a su vez, la modela. A la manera del arrecife de coral, del planal o de la termitera, la ciudad es *simultáneamente* soporte y consecuencia de la actividad del organismo social que vive en su seno. Es particularmente difícil, si no imposible, disociar, en todo organismo, estructura y función. Razón por la que no debe temerse la analogía entre una ciudad y un <organismo vivo>, a condición de colocar esta expresión entre comillas.

¿Cuáles son los principales elementos que componen una ciudad y cómo entran en interacción? Cuando se observa el plano de una ciudad, la importancia de las estructuras enmascara los procesos funcionales. Ciertamente, entre las calles, las avenidas y las manzanas de casas, se ven estaciones, monumentos, hospitales u organismos administrativos. Todo parece solidificado. El aspecto funcional de la ciudad escapa a la observación. Para apreciar su complejidad se necesitaría el equivalente de un atlas que resultará la diferencia del tejido urbano en zonas de actividades; los flujos de energía, de materiales y de información que circulan entre las empresas, las administraciones, las zonas residenciales, el entorno. Agrupando ciertas grandes categorías funcionales del tejido urbano, parece posible dar una idea del funcionamiento de conjunto de una ciudad; y, sobre todo, aproximar algunas

de sus estructuras y funciones a las de otros organismos, cualquiera que sea su nivel de complejidad.

Las interacciones entre los individuos y las organizaciones, en virtud de los medios de comunicación, permiten garantizar las grandes funciones del sistema urbano: utilización de energía y eliminación de desechos; producción, consumo y administración; cultura y ocio; informaciones; comunicación y transporte; protección y seguridad. Estas diversas funciones se amaterializan por estructuras diferenciadas.



Alojamiento. Mayor superficie de las ciudades está ocupada por los alojamientos de los habitantes. Estos alojamientos aseguran el establecimiento y la protección del hogar. El conjunto de las zonas residenciales representa alrededor del 40 por 100, en promedio, de la superficie urbana.

Empresas y comercios: lugares de trabajo ed la mayoría de los habitantes de las ciudades y de los suburbios; la empresa asegura la producción de los bienes y de los servicios necesarios a la comunidad. La distribución de los productos se hace por el sector comercial, desde el pequeño comercio hasta las grandes cadenas ed almacenes y supermercados. Un puesto importante está reservado a la alimentación, que supone cerca de un 25 por 100 del presupuesto de los consumidores en las naciones industrializadas.

Comunicaciones y transporte. Las redes se diferencian por funciones, según la naturaleza de lo que acarrean: personas, materiales o informaciones. En los dos primeros casos, se trata principalmete de la red de avenidas y calles; sistemas de transportes urbanos (metro, autobus, taxis) e interurbanos o internacionales (estaciones, puertos y aeropuertos). En el tercer caso, hilos y cables de teléfono, centrales telefónicas y postales, emisoras de radio y televisión, organismos de prensa y de difusión de textos impresos.

Almacenamiento. Los grandes depósitos de la ciudad se distinguen también según su utilización: energía, materiales o información. El almacenamiento de la energía se realiza en los depósitos de gasolina y de fuel, de gas, de carbón. Cuando se trata de géneros alimenticios perecederos, en almacenes especializados (mercados, mataderos, depósitos frigoríficos) o de ciclo más lento (silos de grano, cisternas). Los más diversos materiales son acopiados en depósitos, almacenes. El agua potable, en inmensos reservorios. En cuanto a las informaciones, son memorizadas en las bibliotecas, en los archivos, en los bancos de datos de los ordenadores. Otra forma de almacenamiento, al del dinero, se efectúa en las cuentas y cajas de los bancos.

Organismos administrativos y financieros. Una superficie importante de las grandes urbes está ocupada por organismos para la regulación de los equilibrios económicos y sociales: ministerios, organismos gubernamentales (nacionales o internacionales), bancos y otros organismos financieros.

Distribución de la energía y eliminación de los desechos. La energía entra y circula en la ciudad de las redes eléctricas, las canalizaciones del gas, las estaciones de servicio de gasolina. Sale en forma de calor y desechos colectados por los conductos del alcantarillado o por camiones especializados. Estos desechos son parcialmente eliminados por las estaciones depuradoras o incineradoras, o se acumulan en vertederos.

Existe, por último, toda una serie de otros organismos relacionados más directamente con las actividades propias de los habitantes: cultura y vida artística (museos, monumentos, teatros); salud (hospitales, clínicas); educación (colegios, universidades); ocio y distracción (cines, campos de deporte, parques, cabarets); protección y seguridad (cuarteles de bomberos, de militares, comisarías de policía, prisiones); culto (iglesias, cementerios). Estos órganos diversos de la ciudad se agrupan frecuentemente en barrios: barrio de los negocios, de los espectáculos, de las universidades; barrio industrial o comercial, ministerios, museos, y también en espacios verdes que constituyen, como se dice vulgarmente, los <pulmones> de la ciudad.

El metabolismo de las ciudades

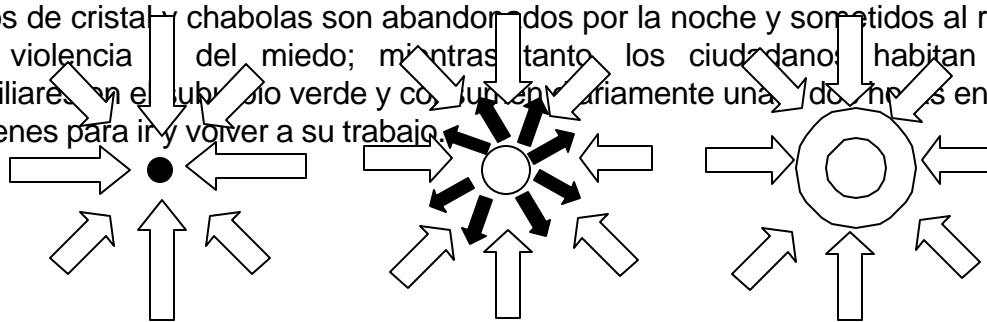
Toda ciudad tiene una historia, pero también una vida de cada día. Se nutre de toneladas de alimentos, de combustibles y de agua destinados a mantener a los habitantes de su casa, en su trabajo y durante sus ocios. Para una aglomeración de un millón de seres humanos, este consumo cotidiano representa unas 2000 toneladas de alimentos, 4000 toneladas de combustibles y 630.000 toneladas de agua. París consume el 30 por 100 del petróleo utilizado en Francia, 20 por 100 del carbón, 50 por 100 del gas y el 15 por 100 de la electricidad. Y para aplacar su hambre devora todos los días el 25 por 100 de la producción agrícola del país.

También la ciudad debe absorber continuamente los materiales que sirven para sustituir estructuras usadas o para construir otras nuevas. A semejanza del organismo, la ciudad es asiento de una permanente renovación de los elementos que la componen. Tal renovación dinámica se traduce, de manera espectacular, por la coexistencia de obras de demolición, a veces de todo un barrio, con obras de construcción, pero se ejercita a todos los niveles de la organización.

Todas las ciudades arrojan sobre el entorno de los despojos de su metabolismo. En una ciudad de un millón de habitantes, estos despojos representan, a diario, 500.000 toneladas de aguas residuales que contienen 120 toneladas de partículas sólidas, 2000 toneladas de desechos y 950 toneladas de contaminantes atmosféricos. Los efectos de estos contaminantes sobre la vida de los individuos son bien conocidos, pero hay uno en el que vale la pena detenerse, puesto que es un resultado directo del metabolismo de las ciudades: la modificación de su microclima.

Por causa de las actividades humanas (calefacción, climatización, industrias, automóviles), la ciudad es una fuente de calor. Pero es además una "jaula de calor" debido a las superficies verticales que amplifican la reflexión de los rayos solares; al relieve atormentado de las construcciones, que acrecienta las turbulencias y reduce la evacuación del calor; y, en último extremo, al hecho de que el agua resultante de las precipitaciones es inmediatamente colectada y eliminada, y no participa en el refrescamiento de paredes y suelos por evaporación. Por todo ello, la temperatura de la ciudad se mantiene a un nivel de varios grados sobre la del campo que la rodea. A los efectos de esta burbuja de calor se añaden los del polvo y aerosoles suspendidos en el aire. Esto crea núcleos de condensación que provocan neblinas y las habituales nubes que oscurecen tan a menudo el cielo de las grandes ciudades. Resultado: 30 por 100 menos de días soleados en invierno y 10 por 100 más de precipitaciones a lo largo del año con respecto a los alrededores inmediatos de la ciudad.

Otra manifestación de la vida cotidiana de la ciudad: las migraciones de los trabajadores. En la mayor parte de las grandes aglomeraciones se crea una sucesión de capas concéntricas de hábitats atravesados por vías de gran circulación, se impone una regulación automática: ruido, la polución, el nerviosismo de las gentes, el coste de los alojamientos, la carencia de seguridad, provocan un movimiento centrífugo hacia el suburbio verde, pero también hacia la provincia. En algunas ciudades americanas, barrios del centro donde se alternan edificios de cristal y chabolas son abandonados por la noche y sometidos al reinado de la violencia del miedo; mientras tanto los ciudadanos habitan casas unifamiliares en el suburbio verde y con frecuencia una jornada en coche o en trenes para ir y volver a su trabajo.



LA CIUDAD ATRAE

MOVIMIENTO DE LOS HABITANTES HACIA LOS SUBURBIOS

ALOJAMIENTOS POR CIRCULOS CONCENTRICOS

La ciudad se muestra así como un sistema autorregulado que controla y equilibra los flujos de los individuos entre su centro y su periferia. En el curso de su historia, la ciudad atraviesa por una fase de crecimiento explosivo, seguida por un periodo de estabilización, más tarde de estancamiento, marcado a veces por la degeneración de algunos barrios, la aparición de las chabolas, la migración crecientemente distanciadora de los trabajadores, y la degradación de emplazamientos representativos de una herencia cultural y artística.

4. la empresa

Como consecuencia de la revolución industrial las empresas se concentran en las ciudades, donde se dan condiciones ideales para su desarrollo: fuerte densidad de población, abundante mano de obra, intensidad de intercambios, actividad de los mercados. Las industrias de una ciudad modelan su personalidad y esculpen su fisionomía. A casi todas las grandes ciudades de un país se asocian una o varias funciones de producción que las caracterizan y las hacen vivir. Extracción de mineral y de energía, grandes fábricas textiles, alimentación, química, siderurgia, construcciones mecánicas, electrónica avanzada.

Hoy día, la mayor parte de las empresas situadas en el corazón de las grandes ciudades son productoras de servicios, orientadas hacia el comercio y la distribución, o constituyen las sedes de empresas nacionales y multinacionales, agrupando las funciones administrativas, comerciales y financieras. Las fábricas se alejan de las zonas centrales de las aglomeraciones, para situarse en su periferia o en provincias, cerca de las fuentes energéticas, de la mano de obra o de la materia prima.

¿Que es una empresa?

Para una persona ajena a la vida de las empresas, todas se parecen. Sólo se ven en oficinas, con sus tradicionales medios de comunicación: teléfono, máquinas de escribir, máquinas de reprografía; algunas veces, talleres y laboratorios. Su organización interna se traduce por organigramas detallados en los que no se patentizan los intercambios, las transferencias, el movimiento de los seres humanos y de las informaciones, es decir, todo aquello que constituye la actividad e la empresa.

Y, no obstante, la empresa posee una vida propia. Nace, crece se desarrolla, madura y muere. Cada empresa es una célula de reproducción del organismo social; y el conjunto de las empresas de una nación forma la mega-máquina de producción. A semejanza de una bomba de dimensiones gigantescas, pone en movimiento los flujos de energía y de dinero que recorren los circuitos del sistema económico*.

La empresa agrupa un cierto número de factores económicos, los organiza y los emplea con vistas a producir bienes y servicios, con el fin de intercambiarlos en un mercado. Una empresa puede estar representada por una sola persona (un abogado o un artista, por ejemplo) o adoptar la forma de una entidad agrícola o de una agrupación de artesanos. Con esta óptica más general, *es empresa toda actividad que culmina en la venta de un producto o de un servicio en el mercado de bienes de consumo o de producción* (ALBERTINI).

La empresa es también un centro de decisión capaz de dotarse de una estrategia económica autónoma, y cuyo principal objetivo debe ser el de *maximizar su beneficio en su entorno técnico y financiero* (ATTALI y GUILLAUME). La empresa ejerce, por tanto, dos funciones principales, una al nivel individual, la otra al nivel societario. La primera función es la producción de bienes y de servicios útiles a la satisfacción de las necesidades de los hombres. La segunda consiste en crear riqueza, o sea, en generar por su autodesarrollo una plusvalía monetaria, reinyectada, en parte, en los circuitos económicos y contribuyendo a la elevación del nivel de vida de la población de un país.

¿Que se precisa para hacer funcionar una empresa?

Primero, una organización, constituida por los departamentos especializados y sus redes de intercomunicación. Departamento de producción, con las fábricas, los talleres, las máquinas. Departamento comercial ligado a su red distribuidora. Administración y gestión (los órganos de la planificación y del control). Investigación y desarrollo (las fuentes de productos nuevos).

Se necesitan también de factores de producción: bajo este vocablo se relacionan los elementos que sirven para *hacer funcionar* la empresa, a saber: trabajo, capital, energía, materiales e informaciones.

El *trabajo* es la energía proporcionada por los obreros, los empleados y cuadros de la empresa para fabricar los productos, tratar las informaciones, clasificar, comunicar, controlar.

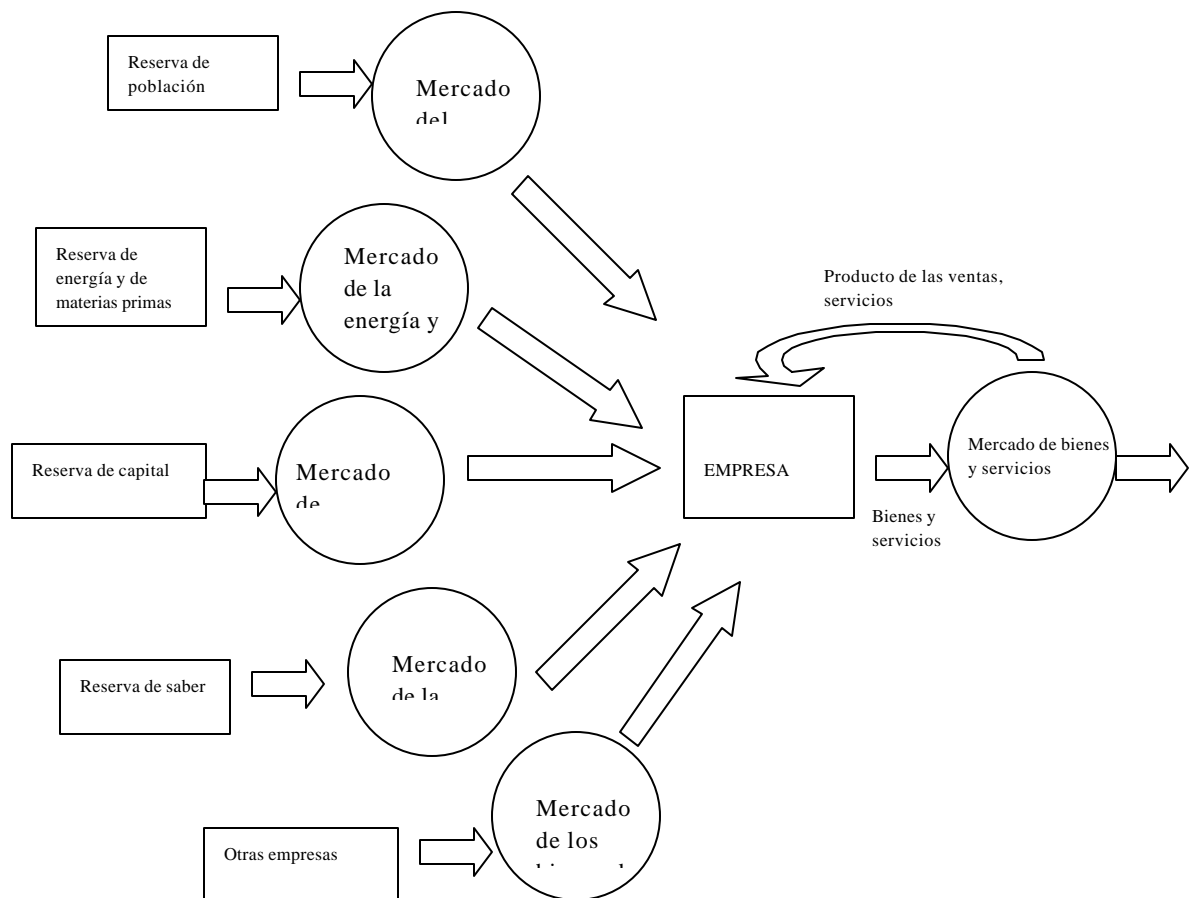
* Lo que sigue intenta describir a grandes rasgos el funcionamiento de una empresa de tipo *clásico*, o sea, perteneciente a una *economía de crecimiento*, sin prejuzgar sobre las finalidades de una o de otra. Se persigue una vez más, como para la economía, ilustrar las características comunes a todos los sistemas complejos

El *capital* está representado por los recursos financieros y los equipos de producción.

La *energía* y los *materiales* son el flujo de combustibles fósiles, de electricidad, de vapor, que hace girar las máquinas, y el flujo de materias primas y de productos semiterminados que sirven de elementos de partida para la fabricación o el montaje.

La *información* : es el saber-hacer (know-how), las patentes, las licencias; todos ellos son bienes inmateriales derivados de la experiencia de los miembros de la empresa y de un saber previamente acumulada.

Los bienes materiales producidos por la empresa gracias a la combinación de estos factores son destinados a otras empresas (son los bienes de producción), o a particulares (bienes de consumo). Los bienes inmateriales producidos por la empresa son los servicios (transportes, publicidad, consejos, seguros, etc). La empresa compra sus factores de producción en mercados especializados, como muestra el siguiente esquema. Recoge el modelo general de la página 36, pero <abriendo los bucles>, al objeto de aplicarlo más directamente a la empresa y de evidenciar los flujos de entrada (inputs) y los flujos de salida (outputs).



La empresa compra o alquila, en estos diversos mercados, los factores necesarios a la producción de los bienes o de los servicios. Por ejemplo, cuando tenga necesidad de dinero para desarrollarse o mantenerse viva podrá *<alquila dinero>*, pagando a sus vendedores con una moneda de un tipo particular, específico de la empresa: *acciones*. Entonces, los vendedores adquirirán una parte (una fracción de la propiedad) del capital de la empresa, convirtiéndose en accionistas de la misma.

La empresa deduce de sus ingresos las cantidades necesarias a la remuneración de los factores de producción. Estas sumas son los salarios (pagados como contrapartida de l trabajo), los *intereses y dividendos* (a cambio de los préstamos o del capital), los *royalties* (a cambio del saber-hacer y de las patentes); pero, también los impuestos del Estado. Por consiguiente, la empresa no puede crear riqueza si no produce más valor del que consume.

El papel del gerente de la empresa

La elección de los objetivos de la empresa, de los medios a emplear para alcanzarlos y de los sistemas de control necesarios para verificar que la empresa está en la buena vía compete a la función de gestión, asumida por el gerente.

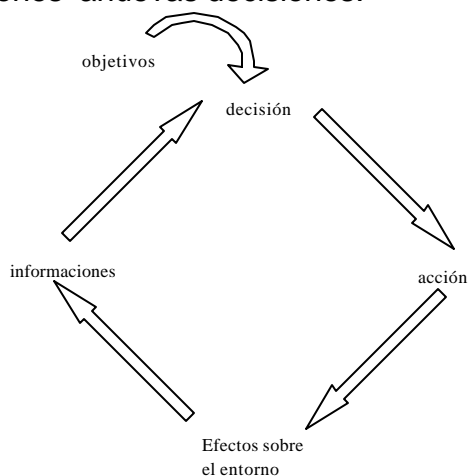
La regulación eficaz –la buena gestión- puede considerarse como el ajuste de los objetivos de la empresa en base a las propiedades del entorno en el que vive. ¿Cuáles son los principales objetivos de una empresa? En primer lugar, la mejora de la productividad, el aumento de la cantidad de bienes y servicios producidos. Después, la buena elección de los recursos financieros y de las inversiones que condicionan la rentabilidad de la empresa. El mantenimiento de la posición en el mercado y la prosecución de los esfuerzos de comercialización, de investigación y de desarrollo, a fin de incrementar la demanda en productos existente o nuevos. La formación de los obreros, de los empleados y de los cuadros. Por último, el mantenimiento de la utilidad social de la empresa, es decir, su papel como agente de transformación de la sociedad, lo que le confiere una responsabilidad pública. Todos estos objetivos operativos se integran en un objetivo global que es de maximizar el beneficio de la empresa.

Las limitaciones que impone el entorno exigen un reajuste de esos objetivos. Las limitaciones son de carácter social (reivindicaciones de los trabajadores, conflictos, relaciones de fuerzas), financiero (control exterior, disponibilidad de los recursos), industrial (capacidad de producción), comercial (competencia) o administrativo (eficacia interna). El gerente trata permanentemente de adaptar los medios de que dispone a la realización de los objetivos, sin olvidar estos tipos de

limitaciones y su importancia en su momento dado. A este objeto ejerce las funciones de planificación, de organización, de control, de comunicación y de formación.

Así, puede considerarse al gerente como un <comprador>, capaz de transformar informaciones en acciones. Tal transformación es la toma de decisión. La organización jerárquica de la empresa constituye un sistema multiplicador, que posibilita la transformación de las instrucciones, provenientes del gerente y de su equipo, en acciones que pueden involucrar importantes recursos humanos, materiales o financieros. Puede concebirse la gestión de la empresa como un sistema de información-decisión-acción.

La función de gestión del gerente se inscribe en el interior de un bucle, que va desde los objetivos a las decisiones, de las decisiones a las acciones, y del resultado de las acciones a nuevas decisiones.



Ahora bien, esta función implica dos modos de acción que pueden parecer contradictorios. De un lado, el gerente debe actuar como un agente de estabilización: para asegurar la supervivencia de su empresa y la seguridad del empleo debe mantener su equilibrio. Del otro, debe asegurar el crecimiento continuo de la empresa. La dosificación de estos dos modos de acción determina el comportamiento temporal de la empresa que puede, consiguientemente, atravesar, como todo organismo complejo, fases de crecimiento, de estancamiento, de regresión o de fluctuaciones.

La estrategia del crecimiento

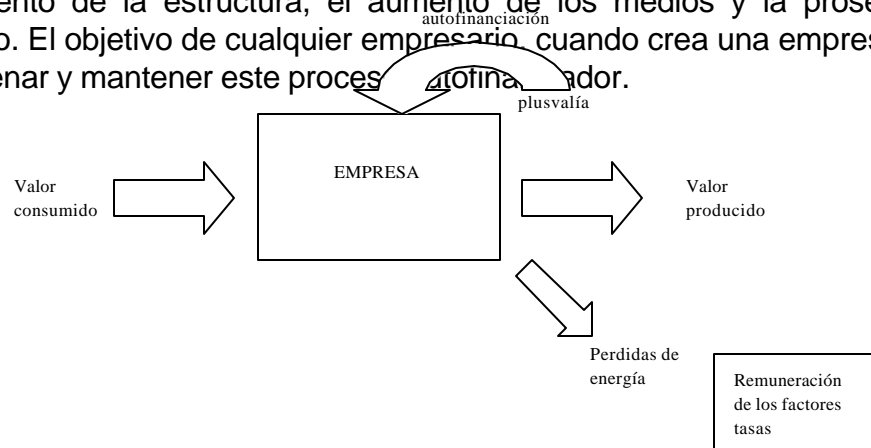
LA estrategia a largo plazo de la empresa tiene por objetivo principal el crecimiento en equilibrio y estabilidad. Las limitaciones clásicas de la empresa (sociales, financieras) dejan sitio a nuevas limitaciones derivadas de la velocidad

de desarrollo de las sociedades industriales y de la aceleración del crecimiento económico.

El equipo directivo debe ver más lejos, decidir más deprisa, preparar previsiones y planes detalladas de desarrollo, hacer más rigurosos los mecanismos de control. Debe tener en cuenta la evolución del medio exterior, de las técnicas, de los gustos y de las necesidades de los individuos. De la competencia, de la tasa general de expansión de la economía nacional o internacional. Esta exigencias a las empresas a adoptar, hasta ahora, una estrategia de crecimiento basada unas veces en la creación de medios nuevos (técnicas, industriales, comerciales), otras en la fusión con otras compañías, la compra o absorción de sociedades que ofrecen perspectivas de diversificación.

Esta estrategia de crecimiento desemboca de manera natural en una estrategia financiera, en la elección del tipo de recursos necesarios para mantener el crecimiento a una tasa compatible con la dimensión y los objetivos de la empresa, permitiendo, al tiempo, una cierta libertad de acción a los dirigentes o a los principales accionistas.

La autofinanciación permite conciliar crecimiento e independencia financiera. La empresa capaz de autofinanciarse desencadena y mantiene un proceso autocatalítico semejante a una explosión. La plusvalía segregada por una empresa bien dirigida es comparable a un *excedente energético*. La reinyección de este excedente y su repartición en inversiones estratégicas (consolidación de la situación financiera, reforzamiento de los equipos, expansión de las redes de venta o de la producción) constituye la autofinanciación. Simultáneamente garantiza el mantenimiento de la estructura, el aumento de los medios y la prosecución del crecimiento. El objetivo de cualquier empresario cuando crea una empresa, es el de desencadenar y mantener este proceso autocatalítico.



Aún iniciándose con dos personas, una empresa bien dirigida puede conseguir un nivel de eficiencia suficiente para su mantenimiento y progresión. Con frecuencia sólo alcanzará una dimensión respetable al cabo de varios años. Ir más deprisa significa casi siempre invertir más dinero. Para <poner en órbita> una nueva empresa en un plazo muy breve se necesitan (además de ideas, hombres y saber-hacer), capitales de un tipo particular que representan la <energía potencial> necesaria a la reacción, para que pueda cebarse y automentenerse. El riesgo puede ser elevado: (cuánta energía será preciso gastara antes de que la reacción cese de consumir y produzca la pequeña cantidad excedentaria capaz de desencadenar la reacción en cadena? Sobre la evaluación de tal riesgo se basa el arte de la creación de una empresa.

5. El organismo

Desde finales del siglo XVIII y en el siglo XIX, a consecuencia de los progresos de la anatomía, de la fisiología y de la medicina, numerosos naturalistas y filósofos como WORMS, SPENCER, SAINT-SIMON, ampliaron la noción de organismo a la sociedad en un conjunto (organismo político, organismo social). Recurriendo a veces a analogías ingenuas o audaces, algunas de las cuales hoy nos hacen sonreír, contribuyeron, sin embargo, a ensanchar el horizonte de nuestro conocimientos sobre la vida del hombre en sociedad.

En efecto, la metáfora del organismo posee una gran potencia de evocación. Permite, según la bellísima expresión de JUDITH SCHLANGER, "integrar los saberes y los sentidos". Engloba la complejidad y la interdependencia en una totalidad integrante y autónoma en la que la riqueza y la variedad de los enlaces entre los elementos resultan a veces más importantes que los mismos elementos.

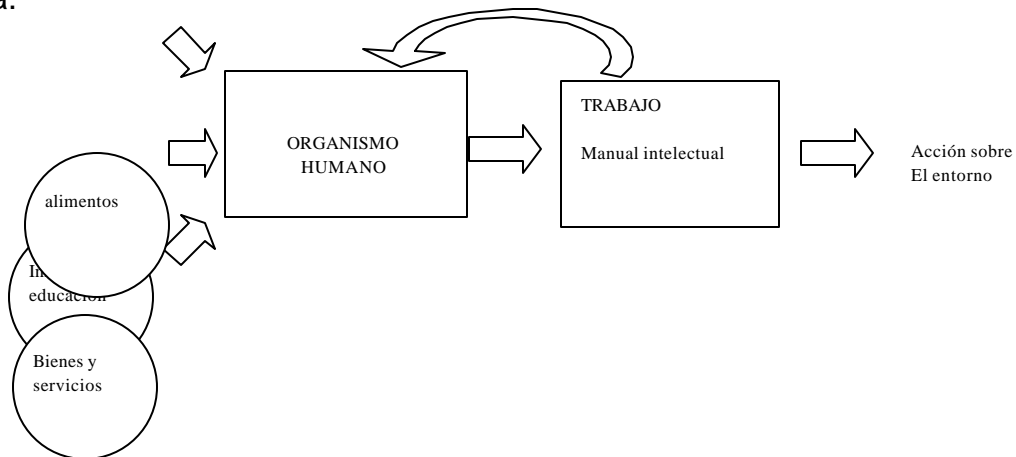
Al término de esta primera parte, se van a encontrar a escala del organismo y de la célula principios y modelos de funcionamiento comunes a los "organismos" ya

vistos. Igual que la ecología y la economía, el organismo y la célula serán observados a través del “macroscopio” a fin de concentrar la atención en los grandes rasgos de su funcionamiento y de su regulación, y para segregar las nociones de base de un nuevo método de enfoque de la complejidad.

Las grandes funciones del organismo*

He aquí un hombre trabajando. En una empresa, por ejemplo. En ella ejerce una función especializada. Su trabajo puede ser manual (desplazar o colocar objetos, aplicar fuerzas); o intelectual (apartar, clasificar, tratar informaciones, organizar, controlar). Su acción sobre su entorno inmediato se manifiesta así por *fuerzas* o por *informaciones*, transmitidas a otros hombres o máquinas.

¿De qué tiene necesidad este hombre para efectuar su trabajo y producir estos esfuerzos? Básicamente, de energía y de informaciones. La energía es suministrada por los alimentos que se procura y que consume regularmente. Las informaciones pertenecen a dos categorías. Un stock de partida: la educación que ha recibido y que le permite ejercer su saber-hacer en su profesión. Después, las instrucciones que guían su trabajo y las señales provenientes de su entorno y del interior mismo de su propio organismo. A cambio de su trabajo recibe una remuneración, con la que se procura alimentos y otros bienes o servicios que necesita.



-
- La función de reproducción, al no intervenir permanentemente, no será considerada aquí. Por otra parte, en la descripción que sigue emplearemos de forma deliberada términos muy generales, con vistas a poner de manifiesto las analogías entre el organismo y los otros sistemas que han sido descritos.

Para mantenerse con vida y cumplir un trabajo, recibir y generar informaciones, se precisa una organización particular, sustentándose en agentes de transformación (los órganos), una red de distribución de la energía y una red de comunicación. Las líneas generales de tal organización vienen trazadas en el esquema de la página 54.

Las transformaciones de la energía

El sistema de transformación de la energía agrupa varios órganos y funciona en circuito casi cerrado. Emplea alimentos provenientes del exterior y oxígeno, hace funcionar convertidores sucesivos, una red de distribución, unidades de filtración, de reciclaje y de eliminación de los desechos.

Los alimentos ricos en energía (azúcares, grasas) y en materias primas indispensables (proteínas, ácidos aminados) pasan a la de convertidores del sistema digestivo (estómago, intestinos). En el curso de estas diferentes transformaciones, las sustancias extraídas de los alimentos de base son utilizados inmediatamente o almacenadas para uso ulterior. El oxígeno del aire es aspirado por los pulmones que expelen, en la expiración, el principal gas de combustión del organismo, el gas carbónico. La energía extraída de los alimentos, el oxígeno y numerosas sustancias indispensables son distribuidas y transportadas por un fluido (sangre) que circula en una red ramificada. Esta circulación se mantiene por el trabajo de una bomba (el corazón) capaz de bombear 5000 a 6000 litros diarios de sangre. Al ser vertidos en la sangre los despojos del metabolismo y los gases de combustión, un sistema de filtración, de reciclaje y de eliminación de los desechos debe garantizar la regeneración de este fluido vital. Los principales filtros del organismo son los pulmones, los riñones y el hígado.

La sangre se regenera en los pulmones por eliminación del gas carbónico y absorción del oxígeno por la hemoglobina de los glóbulos rojos. Los riñones filtran y reciclan la sangre tras haberla desembarazado de sus desechos. El 99 por 100 del fluido que los atraviesa es devuelto a la circulación, siendo transformado el resto en orina que elimina los desechos. En lo que respecta al hígado, éste actúa como un filtro químico reteniendo y destruyendo sustancias internas (o provenientes del exterior) que pudieran ser tóxicas para el organismo.

La economía y el tratamiento de las informaciones

El sistema de tratamiento de las informaciones se compone de transductores y de memorias; de órganos de tratamiento, de control y de regulación; y de dos redes de comunicación interconectadas, una electroquímica (los nervios), la otra, química (las hormonas).

Los transductores permiten transformar las señales procedentes del entorno en informaciones reconocibles por el sistema de tratamiento. Estos transductores (captadores, sensores) son de naturaleza fotoeléctrica (detección de los olores), mecánica (rozamientos). Constituyen el sistema sensorial.

Las informaciones son almacenadas en memorias y tratadas en diferentes zonas de la médula espinal o del cerebro: zona olfativa, zona visual, zona auditiva. El control y la regulación de las grandes funciones del organismo son efectuados por el cerebro o directamente al nivel de las glándulas endocrinas. La regulación necesita a menudo la cooperación de varios órganos. Por ello es esencial una red de comunicación interna entre órganos. Esta red es de índole electroquímica. Permite la conducción de un impulso eléctrico (que representa la información) por intermedio de los nervios. Pero es también de naturaleza química: la emisión por parte de una glándula endocrina de una molécula-sígnal, una hormona, a la corriente sanguínea. Todos los demás órganos irrigados por la sangre reciben asimismo esta hormona, pero, debido a las instrucciones codificadas en ella encerradas, sólo los órganos concernidos son informados de la acción reguladora a emprender. Estas redes de comunicación constituyen el sistema nervioso y el sistema endocrino.

La armazón interna, el desplazamiento y la protección

El organismo, delimitado por la piel, se asemeja a un saco lleno en un 60 por 100 de agua. Los órganos que contiene y sus redes de comunicación no poseen una consistencia suficientemente rígida para evitar que el conjunto se desplomase bajo su propio peso. El esqueleto cumple oficio de armazón. Numerosos huesos, de los doscientos seis de que consta, funcionan como brazos de palanca. Son indispensables para todo movimiento y para cualquier desplazamiento. La contracción de los seiscientos músculos del sistema muscular suministra la fuerza motriz capaz de actuar sobre los brazos de la palanca o sobre los tejidos para provocar movimientos y locomoción.

La piel es una barrera externa a la invasión del organismo por microbios o cuerpos extraños. Cuando se produce una lesión, aquella se reconstituye mediante la cicatrización. Es, además, una superficie sensible, capaz de detectar, gracias a terminaciones nerviosas, las informaciones provenientes del entorno. Interviene igualmente en la regulación de la temperatura del cuerpo. El organismo posee un sistema de autodefensa frente a los ataques de sustancias extrañas. Sus armas son

los anticuerpos, capaces de reconocer y destruir proteínas extrañas, y los glóbulos blancos que absorben y neutralizan las bacterias peligrosas para el organismo.

El equilibrio del medio interior

La organización del cuerpo permite al ser humano actuar sobre su entorno y reaccionar a informaciones o agresiones que de él provienen. Los fisiólogos muestran que las reacciones del hombre y de los animales a estas agresiones se reducen a tres comportamientos básicos: la fuga, la lucha y la adaptación.

Si el entorno se hace desagradable, hostil o peligroso, el organismo puede reaccionar por la fuga: simplemente, cambia de entorno, hasta asentarse en un medio donde se sienta a gusto. También puede atacar o defenderse. Modificar por una acción deliberada el entorno que le amenaza y volver a condiciones que le son favorables.

El organismo parece así adaptarse permanentemente a nuevas condiciones de vida. Realmente, esta adaptación nunca es perfecta. El ser humano experimenta dificultades para adaptarse totalmente a un medio dado, lo que le provoca frecuentemente frustraciones, angustias, malestares. Componentes positivos, sin embargo, y que se encuentran casi siempre en la raíz de acciones conscientes o inconscientes conducentes a un cambio o a transformaciones.

Un hombre agredido por el entorno (o informado de un placer o de un peligro inmediato) se prepara a la acción. Su organismo moviliza reservas energéticas y segrega determinadas hormonas, como la adrenalina, que le prepara a huir o a luchar. Esta movilización se expresa por manifestaciones fisiológicas bien conocidas. Bajo el efecto de una emoción, de un peligro, de un esfuerzo, el corazón late más deprisa. La respiración se acelera. El rostro enrojece o palidece. El cuerpo transpira. Se entrecorta el aliento, se tienen sudores fríos y estremecimientos, las piernas tiemblan. Estas manifestaciones fisiológicas denotan el esfuerzo del organismo para *mantener su equilibrio interno*. El trabajo efectuado puede ser voluntario: beber cuando se tiene sed, comer cuando se tiene hambre, ponerse más ropa cuando se tiene frío, abrir la ventana si hace demasiado calor. O involuntario: entonces se traduce por temblores o por la transpiración.

El equilibrio interno del organismo, indicador último de su buen funcionamiento, es el mantenimiento a una tasa constante de la concentración en la sangre de un cierto número de moléculas y de iones esenciales a la vida, y el mantenimiento de un valor determinado de ciertos parámetros físicos tales como la temperatura. Y ello a pesar de las modificaciones del entorno.

Tan extraordinaria propiedad del organismo no ha dejado de integrarse a numerosos fisiólogos. Ya en 1865, CLAUDE BERNARD observaba, en su *Introducción a la médecine expérimentale*, que la «constancia del medio interior es

la condición esencial de una vida libre>. Pero era necesario encontrar un concepto que permitiera agrupar el conjunto de los mecanismos que regulan el organismo. Este concepto se le debe al fisiólogo americano WALTER CANNON. En 1932, impresionado por la <sabiduría> del organismo (*the wisdom of the body*), capaz de asegurar con tal eficacia el control de los equilibrios fisiológicos, forma la palabra *homeóstasis* partiendo de dos palabras griegas que significan < permanecer constante>. La noción de homeóstasis ocupa desde entonces un puesto central en cibernética.

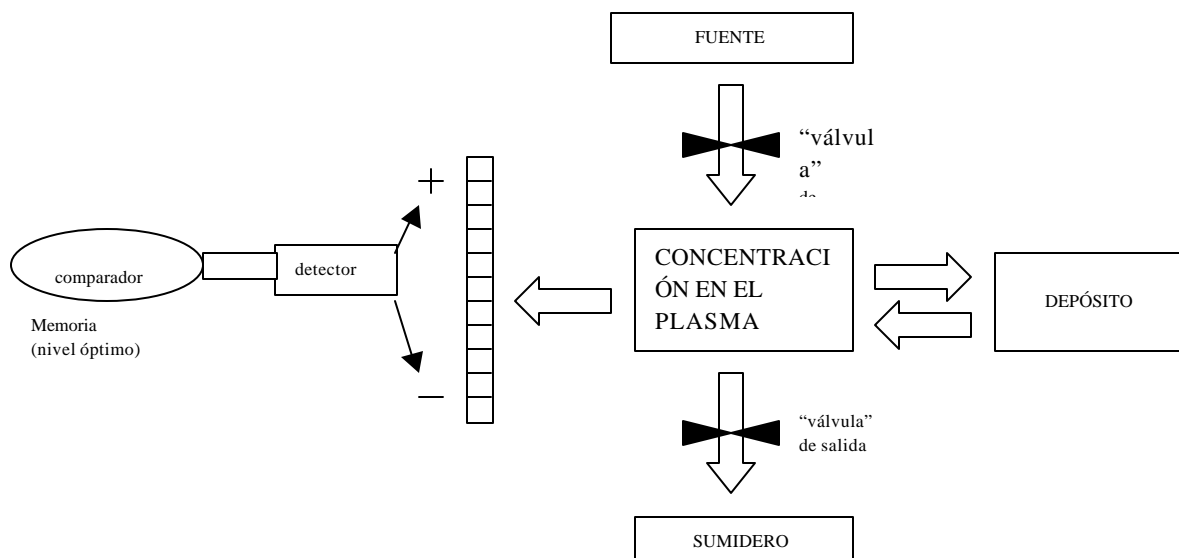
La regulación de las reacciones de la vida

El medio interior puede, muy justamente, identificarse en el principal fluido que circula en el organismo y que baña los órganos y las células: el plasma sanguíneo.

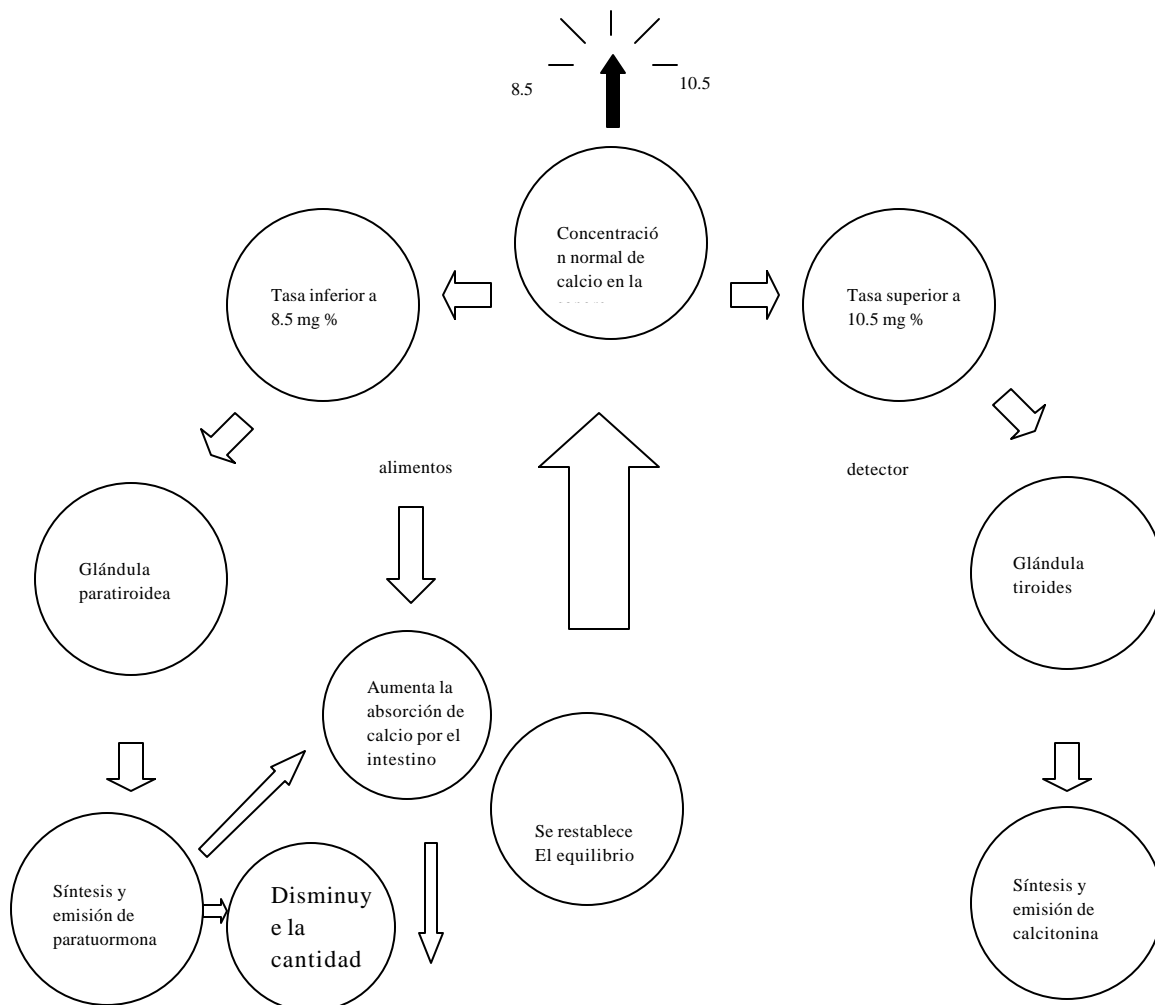
El plasma es un medio acuoso, en equilibrio con el fluido extracelular existente entre los capilares y las células. Un residuo del océano primitivo donde se bañaban los primeros organismo vivos. El plasma representa un 55 por 100 de la sangre (el 45 por 100 restante: glóbulos rojos, glóbulos blancos y plaquetas). Está compuesto de 92 por 100 de agua y de 8 por 100 de moléculas esenciales para la vida, tales como la glucosa y los ácidos aminados, los ácidos grasos, las hormonas (insulina, adrenalina, aldosterona), y de iones como el calcio y el sodio.

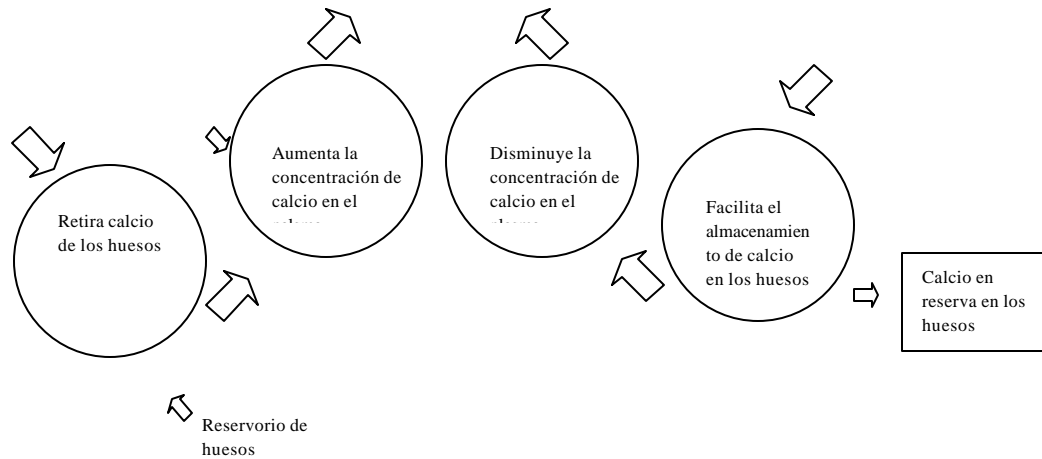
¿Cuáles son las principales propiedades del plasma sobre las que interviene la regulación? La temperatura, mantenida alrededor de los 37° en el ser humano y en la mayoría de los mamíferos. La concentración de iones calcio y de iones sodio. La concentración de hormonas y de glucosa. La presión y el volumen sanguíneos. El número de glóbulos rojos. La acidez y la concentración de agua en el plasma.

La regulación se lleva a cabo por medio de un mecanismo de control, compuesto por un *detector*, un *comparador* y una *memoria* en la que están inscritos los valores límites que no deben ser sobrepasados. Cada molécula o cada ion presente en el plasma proviene de una <fuente>, puede ser almacenado en un depósito y desaparece en un <sumidero>. Se puede representar el modelo general de una regulación por el siguiente esquema.



Uno de los ejemplos más sencillos es el de la regulación de la concentración de *calcio*. El calcio desempeña un papel muy importante en la contracción muscular, en la formación y en la composición de huesos. Su concentración en el plasma se mantiene de manera notable en valores comprendidos entre 8,5 y 10,5 miligramos por cien mililitros. El calcio entra a diario en el organismo a través de los alimentos (v.g., en la leche, que lo contiene en abundancia). Puede ser almacenado en el inmenso depósito de calcio que son los huesos. Sólo una reducida porción es excretada por la orina. La regulación de su concentración en el plasma se efectúa de la siguiente manera:





Cuando la tasa de calcio disminuye demasiado (por debajo de 8.5 mg%) un detector molecular, situado en los tejidos de las glándulas paratiroides, envían una señal que desencadena la síntesis de hormona paratiroidea. Esta hormona, liberada en la sangre, actúa de tres maneras: 1) retirando más calcio de los huesos; 2) frenando la pérdida de calcio por la orina; 3) aumentando la absorción de calcio por el intestino. Resultado: sube la concentración de calcio. Si subiera demasiado (por encima de 1005%), un detector en la glándula tiroides transmite una señal desencadenante de la síntesis de la hormona calcitonina, que actúa acelerando el almacenamiento de calcio en los huesos, lo que causa el descenso del porcentaje de calcio en el plasma.

El director de orquesta de las funciones instintivas

La regulación de las otras <constantes> del plasma hace intervenir generalmente al cerebro y al comportamiento. Uno de los detectores primeramente informados de las modificaciones internas del organismo es una región cerebral, cuyo papel como centro integrador de las funciones vegetativas (hambre, sed, regulación de la temperatura del cuerpo o comportamiento sexual) es muy importante. Tal centro es el hipotálamo, director de orquesta de las funciones instintivas.

Hambre. Cuando tenemos hambre el hipotálamo detecta un descenso del índice de glucosa, de ácidos aminados o de ácidos grasos en el plasma. También integra otras señales (temperatura del cuerpo, distensión del estómago) que aumentan la sensación del hambre. La constante de tiempo de este mecanismo de regulación es esencial. Efectivamente, entre el momento en que se tiene hambre y aquél en que se consume alimento puede transcurrir un intervalos considerable. Por consiguiente, debe existir un mecanismo de respuesta rápida que haga aumentar la tasa de glucosa en sangre. Las glándulas suprarrenales detectan este desequilibrio y segregan adrenalina, que transforma las reservas de glucógeno del hígado en glucosa inmediatamente utilizable. Resultados: en menos de quince minutos el índice

de glucosa comienza a ascender. A más largo plazo (esto es, unas dos horas más tarde), la secreción de hidrocortisona por la corteza suprarrenal permite la transformación de las proteínas en glucosa. En este caso, los resultados no se manifiestan sino al cabo de seis a ocho horas.

Sed. Cuando al plasma se concentra demasiado, el hipotálamo envía una señal a la glándula hipófisis, que segrega hormona antidiurética que, a su vez, desencadena la liberación de vasopresina, actuando ésta sobre los riñones. Resultado: la orina fabricada se hace más concentrada, siendo recuperada una parte del agua para ir a diluir el plasma. Al mismo tiempo, se experimenta una sensación de sed que acciona comportamientos conducentes a absorber líquidos.

Temperatura. La temperatura está notablemente controlada a 37° en el hombre y no varía más que entre 35° y 44° en la mayoría de los animales de sangre caliente. Esta regulación controlada al nivel del hipotálamo (sensación de frío o de calor), reposa sobre el aislamiento térmico (vestidos, pieles, grasa, calefacción, climatización) y sobre la producción interna de calor (combustión de grasas, contracción de los músculos por los escalofríos, por ejemplo). La evacuación del calor excedente se realiza por la sangre, y su disipación, por la piel. La evaporación producida en la transpiración refriega considerablemente el organismo.

El cerebro: ¿integrador o centro de decisión?

Existen numerosos otros tipos de regulaciones que actúan al nivel superior de la corteza y hacen intervenir las múltiples facetas del comportamiento. Se fundan estas regulaciones, no ya solamente en simples señales de error interno, sino en una multitud de informaciones del exterior: símbolos o signos, jerarquizados en capas de valores, integrados en reglas de conducta y susceptibles de desencadenar una cascada de comportamientos. En función de sus escalas de valores personales, un hombre puede decidir hacer la huelga del hambre, mantenerla hasta la muerte. Escoge así otra finalidad distinta a la de la conservación de su propio organismo. No responde ya a la <señal de error>. Esto evidentemente no puede hacerlo la glándula o el órgano.

Intervienen también el placer y el miedo. En una región del hipotálamo existen haces de fibras nerviosas que parecen desempeñar un papel esencial en el sistema de recompensa del organismo. Si se estimula en un animal de laboratorio por medio de descargas eléctricas uno de esos haces, el animal se pone a comer con bulimia. En presencia de los animales de sexo opuesto, se pone a cupular con frenesí. Si se le deja la posibilidad de estimular por sí mismo este centro de placer, se entrega hasta el agotamiento a esta actividad narcista llevando la frecuencia de los estímulos hasta ¡8000 por día! Por el contrario, cualquier estimulación del haz complementario de fibras nerviosas provoca reacciones típicas del dolor, saltos, mordeduras, gritos agudos, posturas de defensa.

Las regulaciones reales del organismo necesitan circuitos complicados *que se prolonga bastante más allá de los límites del organismo* y hasta el corazón de su entorno. Volvamos a la imagen del principio, un ser humano trabajando en la empresa. La búsqueda de recompensa, de consideración, incluso de un cierto placer (de dominación, de poder o, simplemente, del trabajo bien hecho), junto al temor dimanante de la disciplina y de la jerarquía de la empresa, actúan permanentemente sobre las regulaciones de su equilibrio interno y de su equilibrio con su entorno inmediato. Estrés, angustias, frustraciones, alegrías, placer, bienestar, ejercen de esta forma una influencia cotidiana sobre las regulaciones hormonales, sobre la movilización de los recursos energéticos y, en definitiva, sobre nuestra salud física y mental.

El organismo está, por consiguiente, informado de continuo funcionamiento de sus órganos y de sus equilibrios interno en virtud de las señales procedentes del interior y del exterior. El cerebro aparece como el *integrador* de esas diversas señales y no como el centro jerárquico supremo donde se toman las decisiones: no hay <líder> en el organismo humano.

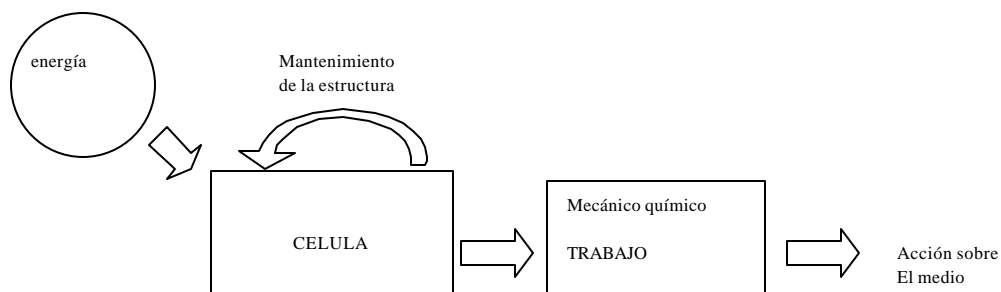
6. La célula

Al nivel de la célula viva las nociones de organismo y de sociedad convergen y se esclarecen mutuamente. La metáfora del organismo ha conocido un cierto éxito aplicada a la sociedad. Ahora le toca a la noción de sociedad el turno de venir a fecundar la biología. < La célula, sociedad de moléculas> escribe FRANCOIS JACOB.

Terminando de abrir las <muñecas rusas>, la última y más pequeña –aquella sobre la que nuestro saber es más nuevo – va a clarificar en cambio toda la jerarquización de los niveles de complejidad que han conducido hasta ella. El bucle va a cerrarse. Desde la energía solar transformada por el ecosistema hasta las reacciones que mantienen la vida de la célula, pasando por la acción de hombre sobre su entorno: todo se correlaciona, se encadena, se cierra y se imbrica.

El mínimo vital de una célula

La célula de un organismo superior conserva su estructura, regula y controla sus funciones metabólicas, crece, se reproduce, efectúa un trabajo, ejerce una función especializada en el seno de un órgano, muere.... . Estas funciones caracterizan la vida: autoconservación, autorregulación, autorproducción y capacidad de evolución.



La vida contrapone a la materia inerte su dinamismo energético. A diferencia del cristal, que no existe ni dura más que en equilibrio estático con su entorno, la célula se renueva continuamente en su composición más íntima gracias al flujo de energía y de materiales que la atraviesa. A pesar de este intercambio molecular, la célula mantiene su organización interna contra la tendencia natural al desorden. La clave de tal estabilidad reside en un stock de informaciones genéticas.

Así pues, estructuras y funciones son inseparables: el mantenimiento de las primeras no puede garantizarse sin el dinamismo energético de las segundas. Las estructuras reposan sobre materiales de obra ordenados según una rigurosa organización espacial, en tanto que las funciones se desarrollan mediante una organización temporal basada en miradas de reacciones elementales rigurosamente coordinadas y sincronizadas. Para asegurar la conservación de su estructura y de sus funciones precisa la célula de los *agentes de transformación*. En la sociedad celular, estos agentes son moléculas que forman grupos restringidos de categorías químicas.

Las dos principales categorías de agentes químicos de la célula son moléculas gigantes (se les llama macromoléculas). Unas son *proteínas*, elementos de construcción o catalizadores que controlan la actividad celular (se trata entonces de enzimas). Las otras, los *ácidos nucleicos** (ADN y ARN), que contienen las informaciones necesarias al ensamblaje de las proteínas y de las enzimas** y a la reproducción de la célula.

Los demás agentes esenciales para la vida celular son primordialmente moléculas-señales, que permiten las comunicaciones: moléculas ricas en energía; moléculas de pequeño tamaño que desempeñan el papel de los bloques de construcción; electrones y sus transportadores (básico en las transferencias de

* Nucleicos, porque se los encuentra principalmente en el núcleo de las células

** N del T. Enzimas es un vocablo de género ambiguo, masculino o femenino, a tenor de cada especialista. Aquí se empleará el género femenino

energía); en fin; moléculas de agua. Toda esta población puede ser evaluada. En una célula tan simple como una bacteria –de una millonésima de milímetro de largo- se cuentan de 10 a 100 miles de millones de moléculas de agua (70 por 100 de la composición total de la célula), de 100 a 1000 millones de moléculas de dimensiones medias que representan cerca de 500 especies químicas diferentes (azúcares, grasas, ácidos aminados, pigmentos, etc.), de 5000 a 10.000 especies distintas de moléculas gigantes de proteínas y de enzimas que constituyen una población de unos 5 millones de moléculas. Por último, una sola clase de macromoléculas que contiene las informaciones necesarias para dirigir la fabricación de todas las demás: el ácido desoxirribonucleico o ADN. La eficiencia de las interacciones y de los intercambios entre estos diversos agentes moleculares está asegurada por un reducido número de organizaciones supramoleculares. Por intermedio de tales organizaciones se ejercen las grandes funciones de la sociedad celular.

La conversión de la energía se realiza en las *mitocondrias*, centrales energéticas. El almacenamiento de la energía y de las reservas, en las vacuolas. La fabricación de las proteínas, en los *ribosomas* – talleres de montajes. El almacenamiento de las informaciones, en el *núcleo*. En fin, el filtrado de las comunicaciones con el exterior, la protección de la célula y la catálisis de un gran número de reacciones fundamentales se realizan al nivel de la *membrana*

Aparece la célula, pues, como un sistema autorregulado, transformador de energía, capaz en todo instante de equilibrar su producción en base a su consumo interno y a la energía de que dispone.

¿Cómo relacionar la célula y el organismo?

Al objeto de relacionar la actividad de la célula con la del organismo entero nos apoyaremos en dos funciones complementarias, la *respiración* y la *alimentación*. Primeramente, ¿que ocurre al nivel celular?

La respiración es la reacción básica de la vida animal. Es una combustión, en presencia de oxígeno, que tiene lugar en la mitocondria. Esta reacción permite a la célula extraer, a partir de elementos obtenidos en el exterior, la energía que necesita para sintetizar materiales, desplazarse, segregar sustancias especializadas, emitir señales eléctricas y, evidentemente, para reproducirse. Considerada desde esta perspectiva, la respiración representa desde luego una función mucho más general que la simple ventilación pulmonar, con la que a menudo se confunde.

De una forma análoga a todo proceso industrial de transformación, la respiración necesita combustibles, un *comburente* y *catalizadores*.

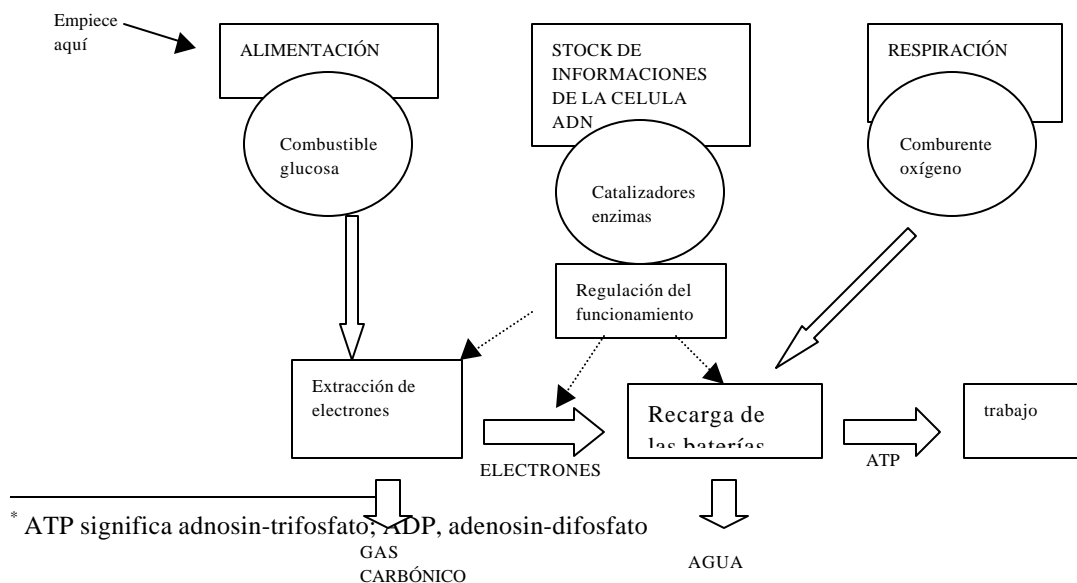
El *combustible* principal de la célula es la glucosa. Se extrae de los alimentos por la cadena de los convertidores del sistema digestivo y es entregada “a domicilio” por la red de distribución de los capilares.

El *comburente* es, naturalmente, el oxígeno del aire, transportado por la hemoglobina de los glóbulos rojos e igualmente depositado a domicilio en el líquido que baña las células.

Los *catalizadores* son las enzimas, que aceleran y controlan las reacciones de combustión y la utilización de la energía obtenida. Esta energía bruta se presenta primeramente en forma de electrones.

La finalidad última de las respiración es la recarga de las <baterías> de la célula. En efecto, todo lo que vive utiliza una molécula que transporta una reserva de energía y desempeña el papel de una suerte de batería portátil, dondequiera que la célula necesite proveer un trabajo químico, mecánico o eléctrico. Esta molécula es la ATP. Cuando ha cedido su energía (cuando la batería se ha descargado), se le llama la ADP*. Puede asimilarse el ciclo de combustión y de extracción de los electrones a un generador, y las cadenas de recarga de la ADP en ATP a un *cargador*.

El siguiente modelo global permite ilustrar tres importantes aspecto del funcionamiento molecular de la célula: la transformación y la utilización de energía; la regulación de conjunto del metabolismo celular por las enzimas; por último, el funcionamiento de una enzima especializada, la hemoglobina.



* ATP significa adnosin-trifosfato; ADP, adenosin-difosfato

La transformación y la utilización de la energía por la célula

Las pequeñas moléculas resultantes de la digestión constituyen las materias primas de la célula. Se trata, sobre todo, de la glucosa, de los aminoácidos y de los ácidos grasos. Pero, antes de ser utilizada en las reacciones de combustión, deben someterse a una preparación. En efecto, el generador no funciona más que a partir de un combustible <refinado>: la molécula de ácido acético activada.

Las reacciones que aseguran esta preparación y la extracción de los electrones se suceden en un riguroso orden. Al final de la cadena forman un ciclo cerrado: el principal residuo de la combustión es asociado a una nueva molécula activada de ácido acético y reintroducido en cada ocasión. Este ciclo que alimenta la vida de toda célula evolucionada se llama ciclo de Krebs*. Es el <generador> de electrones.

El flujo de electrones que sale de este generador sirve para recargar las <baterías> de la célula gracias a la otra serie de reacciones acoplada a la primera**. Este conjunto forma el <cargador>. A todo lo largo de las cadenas del cargador los electrones pierden gradualmente su energía. Hasta el oxígeno, que los espera al extremo de la cadena y que representa el nivel energético más bajo de la cascada de electrones. *Es esta caída de potencial la que mueve toda la maquinaria de la vida*

¿Qué ocurre con ocasión de un esfuerzo violento exigido al organismo? ¿En caso de ejercicio muscular, o de huida ante un peligro? El factor determinante es el número de <baterías agotadas>. Es decir, la relación ADP/ATP (moléculas descargadas/moléculas cargadas). Es este factor el que condiciona todo el funcionamiento del <generador> y del <cargador>.

La mitocondria puede compararse a una estación de servicio donde se recargan regularmente las baterías de un cierto número de clientes. El empleado de la estación tiene siempre baterías cargadas previamente. La relación baterías deacargadas/baterías cargadas es, por tanto, muy pequeña (por ejemplo, 1/100). Igual ocurre en la célula cuando la relación ADP/ATP es muy pequeña. El cargador

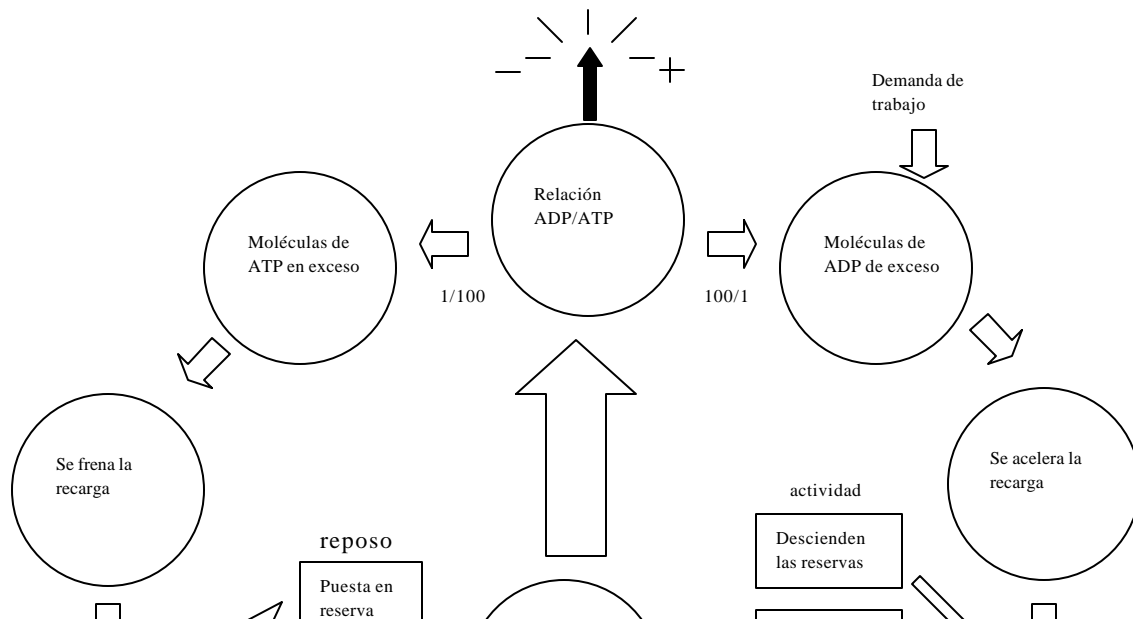
* Del nombre de Sir Krebs, premio Nobel de Medicina 1953, que lo descubrió

** Es la cadena de los <transportadores de electrones> y la <fosforilación oxidativa>

es poco utilizado. La cadenas transportadores de electrones funciona al ralenti y lo mismo el generador. Siendo débil la demanda de combustible y de oxígeno, el organismo pone en reserva la glucosa, en forma de glucógeno, y los ácidos grasos, en forma de grasa. Se duerme, reposa, se recupera.

Más he aquí el esfuerzo. Los músculos trabajan, consumen ATP, se descargan las <baterías>. La cantidad de ADP (baterías agotadas) aumenta rápidamente, La relación ADP/ATP se hace muy elevada (100/1, por ejemplo). La <estación de servicio> es invadida por las demandas de recarga de baterías. La recarga se acelera, lo que gasta más electrones y más oxígeno. El ciclo generador debe entonces desarrollarse cada vez más deprisa, consumiendo cantidades crecientes de combustibles y arrojando aun más gas carbónico. Los índices de glucosa, de ácidos aminados y de ácidos grasos descienden en el líquido extracelular, después en el plasma, mientras que los desechos se acumulan. Toda una serie de detectores situados en las glándulas y en el cerebro registran las modificaciones del equilibrio. Se acelera la ventilación pulmonar, suministrando más oxígeno y eliminando el gas carbónico. El ritmo de la bomba cardiaca se precipita. La sangre circula más deprisa y drena los desechos, en tanto que el estrechamiento de ciertos vasos o la dilatación de otros produce una mejor distribución de la masa sanguínea, en particular allí donde el trabajo es intenso. Enrojece la piel, se tiene calor, se transpira. El trabajo de la mitocondria ha repercutido sobre el *conjunto del organismo*.

Tras el esfuerzo, el hipotálamo detecta la disminución de la tasa de glucosa, de ácidos grasos y de aminoácidos en el plasma. Se tiene hambre y se busca alimento para reponer fuerzas. Si se prosigue el esfuerzo más tiempo, o en caso de ayuno prolongado, por ejemplo, no bastan ya la glucosa y las reservas del hígado. El organismo practica extracciones en las reservas de ácidos aminados de las proteínas que construyen los edificios celulares. Se queman los muebles y las paredes de la casa. Pero no puede perderse más del 40 por 100 del peso sin riesgo de muerte. A partir de un cierto estadio no es ya posible restablecer el equilibrio. Los daños son irreversibles.



La regulación de las reacciones de la vida por las enzimas

Para frenar o acelerar un proceso metabólico catalizado por una cadena de enzimas (análogamente a una cadena de máquinas-herramientas), la célula tiene un medio simple y draconiano. A corto plazo: frenar o detener la máquina-herramienta en cabeza de cada cadena. A más largo plazo: suprimir pura y simplemente todas o parte de las máquinas-herramienta que trabajan en una cadena. Inversamente, la aceleración de la producción se obtiene por el aumento del número de máquinas en servicio en cada cadena o la puesta en marcha de nuevas cadenas paralelas. La producción puede multiplicarse así en un tiempo muy reducido, permitiendo a la célula hacer frente a una demanda importante.

El control último de la actividad celular pasa, pues, obligatoriamente por la síntesis (o el bloqueo de la síntesis) de las enzimas. Esta síntesis se realiza en los talleres de montaje de la célula. Pero los planos originales de todas las especialidades de enzimas imprescindibles a la célula *no abandonan nunca el núcleo*. Basta por ello con prohibir la duplicación de estos planos *para detener la*

síntesis de las enzimas. Mientras haya duplicación esta síntesis se prosigue sin trabas.

Existe, al nivel de los genes del núcleo, una batería de interruptores capaces de controlar el funcionamiento de la máquina duplicadora de planos. Estos interruptores químicos se llaman moléculas de *represor*. Cada represor reconoce una señal específica que le pide bloquear o desbloquear la duplicación de los planos de las enzimas especializadas en una función dada. Esta señal reguladora es generalmente una molécula de pequeño tamaño que se fija al represor concernido, y lo activa o lo desactiva.

Se ve aquí, de nuevo, el papel de las moléculas-señales, sobre las que reposa una gran parte de las informaciones que circulan en las células y en el organismo. Moléculas que son reconocidas por detectores especializados situados, como se ha visto, en las glándulas o en los órganos. Ellas activan interruptores químicos como los represores, desencadenan o inhiben la síntesis de enzimas e, indirectamente, de hormonas u otras moléculas esenciales para la vida.

El funcionamiento de los represores, como el de las enzimas, no es posible sino gracias a mecanismos de reconocimiento que tienen lugar entre los ácidos nucleicos, las proteínas y las moléculas de regulación. Este reconocimiento de información, apoyado en *la forma* de las moléculas (en su morfología), es muy general: es la base del lenguaje universal de comunicación interna empleado por todas las células, sin excepción.

El funcionamiento de una enzima: la hemoglobina

La hemoglobina es una extraordinaria máquina. Un verdadero <pulmón molecular>. Su papel: transportador del oxígeno desde los pulmones a los tejidos gracias a las arterias y a la red de los capilares. Lleva directa o indirectamente el gas carbónico de los tejidos a los pulmones utilizando la red de las venas. De un lado, la sangre roja escarlata, del otro, marrón oscuro.

Más la hemoglobina debe entregar su oxígeno en el lugar correcto, es decir, en los tejidos, y no devolverlo a los pulmones. Lo que constituye una de las propiedades paradójicas de esta molécula: ser capaz de cargarse de oxígeno tan fácilmente como se descarga de él.

Como en todas las enzimas, las propiedades de la hemoglobina dependen de su estructura molecular, de su anatomía. Está formado por cuatro bloques unidos entre sí, formando una compacta estructura, por un modo de corchetes moleculares. Cada bloque es una proteína, la globina, constituida por una cadena de ácidos aminados unidos unos a otros. Poco más o menos en el medio de cada bloque se encuentra una gran molécula, plana como un disco, conteniendo un átomo de hierro

colocado en su centro. Esta molécula es un pigmento (el hemo), proveedor del color rojo de la sangre.

Este pigmento y su átomo de hierro constituyen un <grupo activo> capaz de reconocer y de captar las moléculas de oxígeno. Como hay cuatro grupos, la hemoglobina puede fijar cuatro moléculas de oxígeno. A medida que se va produciendo la absorción de oxígeno en el tejido pulmonar saltan los corchetes moleculares. Por consiguiente los cuatro bloques varían su ordenación espacial: lo que hace *más fácil* la absorción de otras moléculas de oxígeno. ¿Por que?.

Todo el funcionamiento de la hemoglobina reposa sobre una propiedad muy simple del hierro: en presencia de oxígeno su diámetro se reduce en un 13 por 100 app. Tal disminución de tamaño le permite alojarse con mayor facilidad en el plano de la molécula plana del pigmento. El ligero movimiento resultante es amplificado por la cadena a la que el hierro está ligado y que hace el papel de una serie de resortes y de palancas. La tensión hace saltar uno de los corchetes que unía un bloque a otro; parecido a un botón automático que salta de su sitio. Resultado: un bloque cambia ligeramente de forma y de posición en relación a los otros. Lo que facilita la fijación de una nueva molécula de oxígeno por el segundo bloque, y así intensivamente por los bloques siguientes.

Inversamente, la hemoglobina cede todo su oxígeno a los tejidos celulares y tanto más fácilmente cuanto se liberan moléculas de oxígeno. Es gracias a este mecanismo como la hemoglobina no bombea el oxígeno más que en una sola dirección: de los pulmones a los tejidos. En efecto, en todo organismo hay equilibrio entre dos formas de hemoglobina: la forma desoxidada y la forma oxidada.

Todo lo que estabiliza la forma desoxidada permite liberar mi oxígeno desplazando el equilibrio en esta dirección. Es el papel desempeñado por señales reguladoras presentes en los tejidos celulares: la molécula de gas carbónico y los iones H^+ , principales desechos de la actividad de la célula. Así se comprende por qué cualquier esfuerzo nos hace respirar más deprisa.

La actividad de la hemoglobina se funda, pues, en cambios de formas accionadas por señales reguladoras. Estos cambios de forma se llaman modificaciones *alostéricas*, vocablo creado por JACKES MONOD y J.-P. CHANGEUX, que significa "forma diferente". El funcionamiento de la gran mayoría de las enzimas se apoya en este mecanismo fundamental.

He aquí ilustradas a lo largo de unas pocas páginas las reacciones de transformación de la energía y de regulación que caracterizan la vida. Más en el esquema de la página 64 puede notarse que algunas flechas llegan de ninguna parte o vana a ninguna parte (glucosa y gas carbónico de un lado; oxígeno y agua, del otro). Falta, en efecto, un eslabón esencial en la cadena de la vida: la célula vegetal. Es ésta a que fabrica, en el curso de las reacciones de la fotosíntesis, gracias a la

energía solar y al gas carbónico eliminado por los animales, la glucosa rica en energía. Ella libera en la atmósfera el oxígeno necesario a las reacciones de la respiración. Así es como se cierra el circuito con el ecosistema y la energía solar.

Desde los grandes ciclos de la vida hasta los más ínfimos engranajes moleculares y hasta el sutil juego de los electrones, esta última inmersión en el corazón de la célula ha hecho aparecer, así lo espero, la unidad de los mecanismos fundamentales de la naturaleza y de la sociedad. AL enzima, la célula, el órgano, representan, cada cual a su nivel, catalizadores de las que múltiples funciones que mantienen, regulan o transforman la organización de que depende su vida. El hombre es uno de estos catalizadores. Comprender mejor cómo actúan en su propio organismo puede llevar a actuar mejor, desde el interior, en la transformación de los grandes sistemas de los que forma parte: la empresa, la ciudad, la sociedad.

Para ser eficaz, su acción deberá apoyarse sobre un nuevo método de enfoque de la complejidad. Capaz de englobar, al tiempo, los organismos, las organizaciones y sus interdependencias. Pero capaz de integrar, más allá del enfoque analítico, “el saber y los sentidos”.

EL MACROSCOPIO

JOEL DE ROSNAY

Capítulo 2.

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 cielos 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 y 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 emplea a menudo erróneamente y en los dominios más variados: educación, gestión, informática o política. Para numerosos especialistas no es más que una noción vacía: a fuerza de querer decir todo con ella, ya no significa nada.

Más 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 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 de 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. La 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 el 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, 1986), 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 o 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.

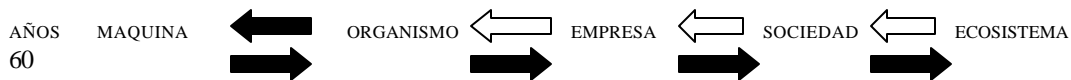
Para ilustrar una nueva corriente de pensamiento suele ser útil tomar un eje de referencia. Este eje será el Massachusetts Institute of Technology, más conocido por las siglas MIT. En tres saltos, cada uno de alrededor de diez años, el MIT va a conducirnos de la cibernética a la actualidad más viva: 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 retroalimentación (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 biónica*, 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 de la empresa, a la sociedad y la ecología.

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

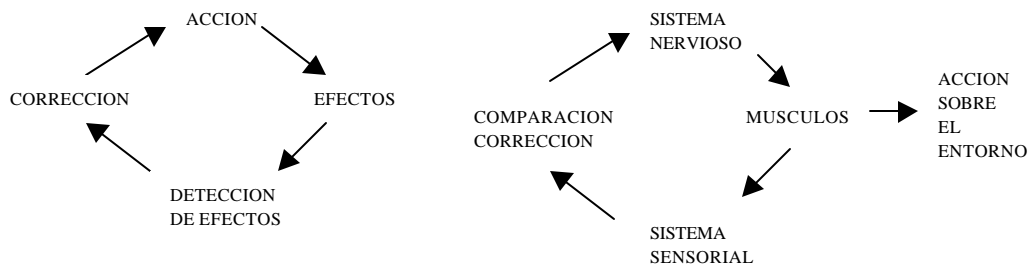
Desde 1919 NORBERT WIENER enseña matemáticas en el MIT. Poco después de su entrada en el instituto conoce al neurofisiólogo ARTURO ROSENBLUETH, antiguo colaborador de WALTER B. CANNON, el estudioso de la homeóstasis, que trabaja en la Harvard Medical School. De esta amistad nacería, veinte años más tarde, 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

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

«enfermedades» que pueden afectarles. Comportamiento «inteligente», va que se apoyan en la «experiencia» (el registro de hechos anteriores) y en la previsión del futuro. Más, también, extraño defecto de funcionamiento: si se intenta reducir los rozamientos, el sistema entra en una serie de oscilaciones incontrolables. Impresionando 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 ampliando 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 DCA, pero igualmente lo es el 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 retroalimentación* 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 descartar 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 periodo 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 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 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 RASHEVSKY, el economista K BOULDING. En 1954 comienzan a aparecer los 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 complejidad organizada bajo un ángulo radicalmente nuevo: el ordenador. Los primeros se llaman ENIAC(1946), EDVAC o EDSAC (1947). Uno de los más rápidos, Wirlwind II, fue construido en el MIT en 1951. Utilizaba, por vez primera, una memoria magnética ultrarrápida inventada por un joven ingeniero electrónico del laboratorio de servomecanismos: JAY W. FORRESTER*.

A la cabeza del Lincon Laboratory, FORRESTER recibe de la Fuerza Aérea el encargo de coordinar la puesta a punto de un sistema de alerta y de defensa (SAGE** 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.

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

* 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.

** SAGE: Semi-Automatic Ground Equipment

2.- ¿Que 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 «timón¹». A uno de los primerísimos mecanismos cibernéticos de regulación de la velocidad de una máquina de vapor, inventado por JAMES WATT y INIA7mEw 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 ecosistema. Su finalidad es mantener sus equilibrios y permitir el desarrollo 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, s 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».

¹ 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, AMPERE se sirvió de la palabra cibernética para designar al «estudio de los medios de gobierno».

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 complejidad².

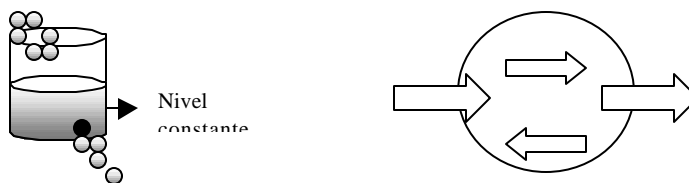
Abertura y complejidad.

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.

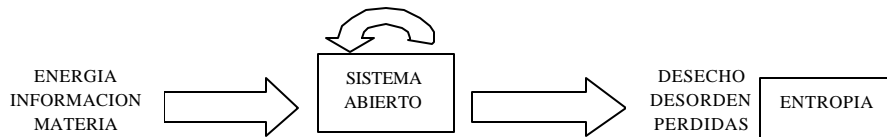
En cierta forma, un sistema abierto es un depósito que se llena y se vacía a la misma velocidad: el agua se mantiene al mismo nivel siempre que los caudales de entrada y de salida permanezcan idénticos.



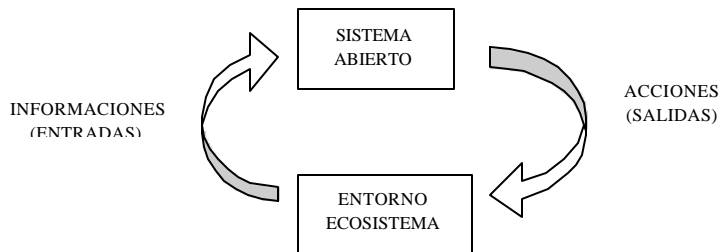
Sistema abierto

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.

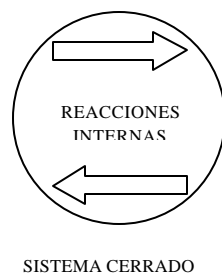
² No considero aquí los «sistemas de conceptos», ni los sistemas mecánicos pilotados por el hombre, sino más bien sistemas de alta complejidad, como los sistemas vivos, sociales o ecológicos.



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 la 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.



¿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:

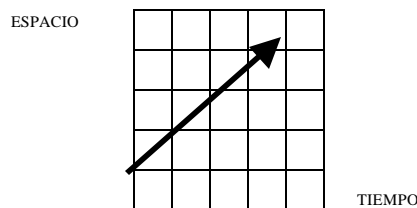
-Un sistema complejo está constituido por una gran variedad de componentes o de elementos dotados de funciones especializadas.

- Estos elementos están organizados en niveles jerárquicos internos (por ejemplo, en el cuerpo humano, las células, los órganos, los sistemas órganos).

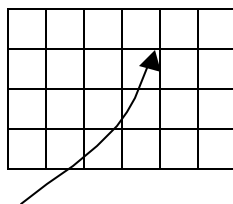
- Los diferentes niveles y elementos individuales están unidos por una gran variedad de enlaces, de lo que resulta una elevada densidad interconexiones³.

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

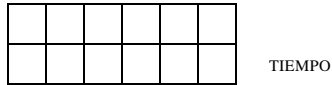
Los efectos de interacciones lineales simples pueden describirse por relaciones matemáticas en las que las variables son incrementadas o decrementadas en una cantidad constante (como en el caso de un automóvil que se desplaza a la misma velocidad media por una autopista).



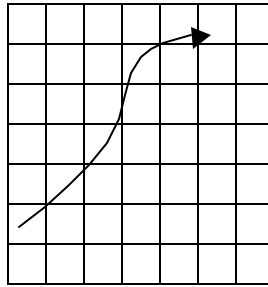
Por el contrario, cuando se trata de interacciones no lineales, las variables se multiplican o dividen por coeficientes, pudiendo ser estos, a su vez, funciones de otras variables. Es el caso del crecimiento exponencial (la cantidad representada en el eje vertical dobla su valor a cada unidad de tiempo) o de una curva en S (crecimiento rápido seguido de estabilización).



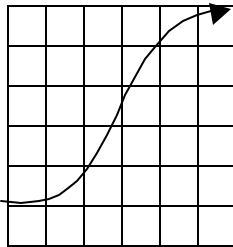
³ La variedad definida por W. ROSS ASHBY es el «número de elementos diferentes comporta un sistema o el número de relaciones diferentes entre estos elementos o de estados diferentes de estas relaciones». Ahora bien, la variedad de un sistema relativamente simple, que conste de siete elementos conectados por relaciones orientadas en los dos sentidos y con dos estados posibles cada una, se expresa ya por la cifra enorme de 2^{42} . ¿Qué decir de interacciones que se tejen en el seno de la población celular (ver pag. 61) y a fortiori en el seno de la sociedad?



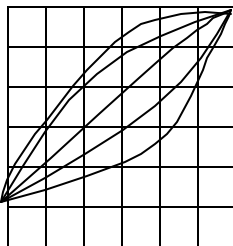
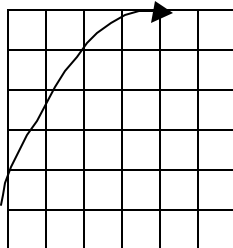
TIEMPO



Otro ejemplo de relación no lineal es la respuesta de las enzimas a diferentes concentraciones de sustratos (moléculas que ellas transforman). En determinados casos, (en presencia de inhibidores), la velocidad de transformación es lenta. En otros (en presencia de activadores), la es rápida, hasta saturación de los grupos activos, lo que se traduce por las curvas siguientes (número de moléculas transformadas en presencia, de inhibidor, en presencia de activador, según la concentración relativa de los inhibidores y de los activadores).



TIEMPO



A la noción de complejidad se asocia, pues, la de variedad de los elementos y de las interacciones, de no linealidad de las interacciones, y de totalidad organizada. De todo resulta un comportamiento muy particular de los sistemas complejos. Este comportamiento es difícilmente previsible. Se caracteriza por la emergencia de propiedades nuevas y una gran resistencia a los cambios.

¿De qué se compone un sistema?.

Dos grupos de rasgos característicos permiten describir de manera muy general los sistemas que se observan en la naturaleza. El primer grupo se refiere a su aspecto estructural, el segundo a su aspecto funcional.

Estructural: se trata de la organización en el espacio de los componentes o elementos de un sistema, de su organización espacial. Funcional: se trata de procesos, o sea, de los fenómenos dependientes del tiempo (intercambio, transferencia, flujo, crecimiento, evolución, etc.). Es la organización temporal.

Es fácil relacionar los elementos estructurales y funcionales utilizando una representación gráfica muy sencilla: un «mecano simbólico», que permite construir los modelos de diferentes sistemas y comprender el papel de las interacciones⁴.

El aspecto estructural.

Los principales rasgos estructurales de cualquier sistema son los siguientes:

- Un límite, que define las fronteras y lo separa del mundo exterior. Es la membrana de la célula, la piel del cuerpo, las murallas de la ciudad, las fronteras de una nación.

- Elementos o componentes, que puedan ser enumerados y reunidos en categorías, familias o poblaciones. Se trata, por ejemplo, de las moléculas de una célula, de los habitantes de una ciudad, del personal de una empresa, o de máquinas, de instituciones, de dinero, de mercancías.

- Depósitos, en los que pueden reunirse los elementos y en los que se puede almacenar energía, información, materiales. En los primeros capítulos se han dado numerosos ejemplos: reservorios de la atmósfera y de los sedimentos, depósitos de hidrocarburos, reservas de capital o de saber, memorias de ordenadores, bibliotecas, filmes, cintas magnéticas, grasas del organismo, glucógeno del hígado.

La representación simbólica de un depósito es un simple rectángulo.

⁴ Esta representación simbólica se deriva de la que utilizan JAY FORRESTER y su grupo de MIT en los modelos de simulación.

- Una red de comunicación, que permite el intercambio de energía, de materia y de información entre los elementos del sistema y entre los diferentes depósitos. Esta red puede tomar las formas más diversas: tuberías, hilos, cables, nervios, venas, arterias, carreteras, canales, gasoductos, líneas eléctricas. Se representa esquemáticamente por trazos llenos y entrecortados enlazando los depósitos u otras variables del modelo.

El aspecto funcional.

Los principales rasgos funcionales de cualquier sistema son los siguientes:

- Flujos de energía, de información o de elementos que circulan entre los depósitos. Estos flujos se expresan en cantidades por unidad de tiempo (como un caudal). Puede tratarse, por ejemplo, de flujos de dinero (salario en pesetas por mes), flujos de productos acabados (número de automóviles, que salen de las fábricas por día o por mes), flujos de personas (número de viajeros a la hora), o de flujos de información (número de bits -cantidad de información- por microsegundo en un ordenador). Los flujos de energía y de materiales hacen subir o bajar el nivel de los depósitos. Circulan en las redes de comunicaciones y se representan de manera simbólica por una flecha negra gruesa. Los flujos de información se representan por una flecha de trazos. Las informaciones sirven de base a las decisiones que permiten actuar sobre los flujos, para mantener, hacer subir o bajar los niveles de los depósitos (reservorios, reservas).

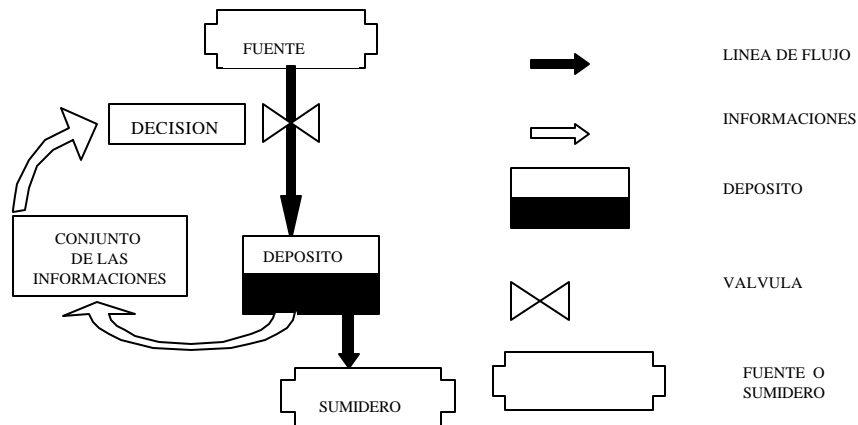
- «Válvulas», que controlan los caudales de los diferentes flujos. Cada válvula puede visualizarse como un centro de decisión, que recibe informaciones y las transforma en acciones: por ejemplo, un director de empresa, una institución, un agente de transformación, o un catalizador tal como una enzima. Estas acciones tienen por efecto aumentar o disminuir la intensidad de los flujos.

Su representación simbólica tiene el aspecto de una válvula o de un grifo colocado en una línea de flujo.

-«Retardos», resultantes de las diferentes velocidades de circulación de los flujos, de las duraciones de almacenamiento en los depósitos, o de los «rozamientos» entre los elementos del sistema. Los retardos juegan un papel muy importante en los fenómenos de amplificación o de inhibición, típicos del comportamiento de los sistemas complejos.

- Por último, bucles de información llamados bucles de retroalimentación (feedback). Desempeñan un papel determinante en el comportamiento de un sistema combinando los efectos de los depósitos, de los retardos, de las válvulas y de los flujos. En el primer capítulo se han mostrado numerosos ejemplos de retroalimentación: regulación de una población, del equilibrio de los precios o del contenido del plasma en calcio.

Existen dos tipos de bucles de retroalimentación: los bucles positivos y los bucles negativos. Sobre los bucles de retroalimentación positiva reposa toda la dinámica del cambio de un sistema (crecimiento y evolución, por ejemplo). La regulación y la estabilidad (restauración de los equilibrios y autoconservación) dependen de los bucles de retroalimentación negativa.



Este modelo reúne los símbolos estructurales y funcionales descritos. Permite, además, ilustrar la diferencia entre bucles de retroalimentación positiva y negativa: si las informaciones recibidas acerca del nivel del depósito permiten comprobar que éste sube, la decisión de abrir más la válvula conduce al desbordamiento. Por lo mismo, si desciende el nivel, disminuir el caudal conduce a la extinción rápida del contenido del depósito. He ahí un bucle positivo hacia el infinito o hacia cero. Por el contrario, la decisión de reducir el caudal cuando aumenta el nivel (e inversamente) conduce al mantenimiento de este nivel a una altura constante. Se está aquí en presencia de retroalimentación negativa.

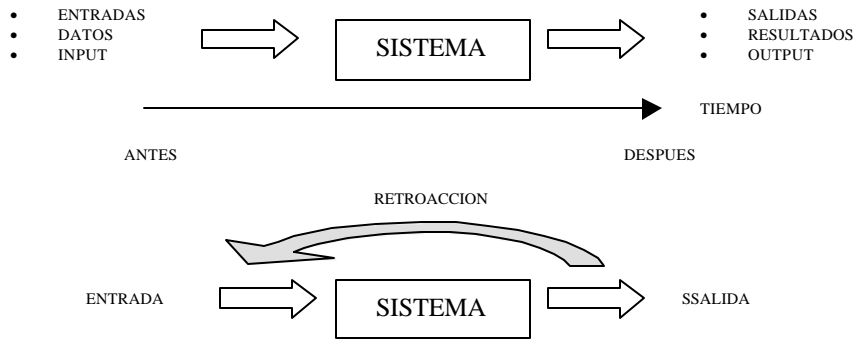
3.- La dinámica de los sistemas: los resortes internos.

El funcionamiento básico de los sistemas se establece por el juego combinado de los bucles de retroalimentación, de los flujos y de los depósitos. Tres nociones entre las más generales del enfoque sistémico y claves del acercamiento de campos muy diferentes de la biología a la gestión, de la ingeniería a la ecología.

La retroalimentación: actuar sobre el pasado.

En un sistema donde tiene lugar una transformación hay entradas salidas. Las entradas resultan de la influencia del entorno sobre el sistema, y las salidas de la acción del sistema sobre el entorno. (A las entradas salidas se las denomina

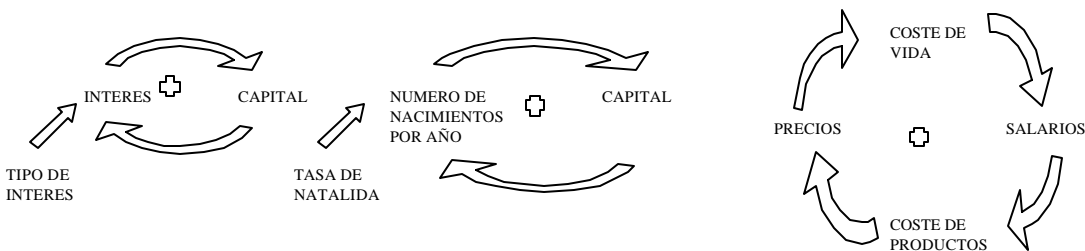
también datos y resultados, o inputs y outputs). Las entradas y las salidas están separadas por la duración; como el «antes del «después», o el pasado del presente.



En todo bucle de retroalimentación (como lo indica su nombre), informaciones sobre los resultados de una transformación o de una acción son reenviadas a la entrada del sistema en forma de datos. Si estos nuevos dato contribuyen a facilitar y a acelerar la transformación en el mismo sentido que los resultados precedentes, se trata de un bucle positivo (positive feedback): sus efectos son acumulativos. Por el contrario, si estos nuevos datos actúan en sentido opuesto a los resultados anteriores, se trata de un bucle negativo (negative feedback). Sus efectos estabilizan el sistema. En el primer caso hay crecimiento (o decrecimiento) exponencial. En el segundo, mantenimiento del equilibrio.

El bucle positivo: aumento de las divergencias.

Un bucle de retroalimentación positiva conduce a un comportamiento divergente: expansión indefinida, explosión (runaway hacia el infinito) o bloqueo total de las actividades (runaway hacía cero). El «más» arrastra al «más», hay efecto de «bola de nieve». Los ejemplos son numerosos: reacción en cadena, crecimiento demográfico, crecimiento de una empresa, capital colocado a interés compuesto, inflación, proliferación de células cancerosas...



Por el contrario, cuando el «menos» arrastra al «menos», las cosas se reducen progresivamente.

Ejemplos típicos son la quiebra de una empresa o el proceso de la depresión económica.

Tanto en uno como en otro caso, un bucle positivo abandonado a sí mismo no puede más que conducir a la destrucción del sistema, ya por explosión, ya por detención de todas sus funciones. La exuberancia de los bucles positivos - esa muerte en potencia - debe ser, por consiguiente, controlada por bucles negativos. Condición esencial para que un sistema pueda conservarse en el transcurso del tiempo.

El bucle, negativo: convergencia hacia un fin.

Un bucle de retroalimentación negativa conduce a un comportamiento adaptivo o propositivo, esto es, parece tender a un fin: mantenimiento de un nivel, de una temperatura, de una concentración, de una velocidad, de un rumbo. En determinados casos, el fin se ha establecido por sí y conservado a lo largo de la evolución: el sistema ha «segregado» su propia finalidad (mantenimiento, de la composición del aire o de los océanos en ecosistema, del porcentaje de glucosa en la sangre, etc.). En otros casos, sido asignado por el hombre a sus máquinas: autómatas y servomecanismos.

En un bucle negativo, toda variación hacia el «más» implica u corrección hacia el «menos» (e inversamente). Hay regulación: el sistema oscila alrededor de una posición de equilibrio que jamás alcanza. El termostato o el depósito de agua provisto de un flotador son ejemplos sencillos de regulación por retroalimentación negativa⁵.

El papel de los flujos y de los depósitos.

El comportamiento de todo sistema, cualquiera que sea su complejidad depende esencialmente de dos tipos de variables: las variables de flujo y las variables de estado (o de nivel). Se simbolizan las primeras por las válvulas que controlan los flujos, y las segundas, (indicando lo que es contenido en los «depósitos»), por rectángulos. Las variables de flujo no expresan más que entre dos instantes o a lo largo de determinada duración y son, por ello, esencialmente dependientes del tiempo. Las variables estado (los niveles) indican la acumulación en el tiempo de una cantidad dada. Expresan, en consecuencia, el resultado de una integración. Si el tiempo se detiene, el nivel permanece constante (nivel estático) mientras que los flujos desaparecen, porque son el resultado de acciones, de actividades del sistema.

⁵ Véase también la regulación de la población, de los precios, de la balanza comercial páginas 20, 35, 36.

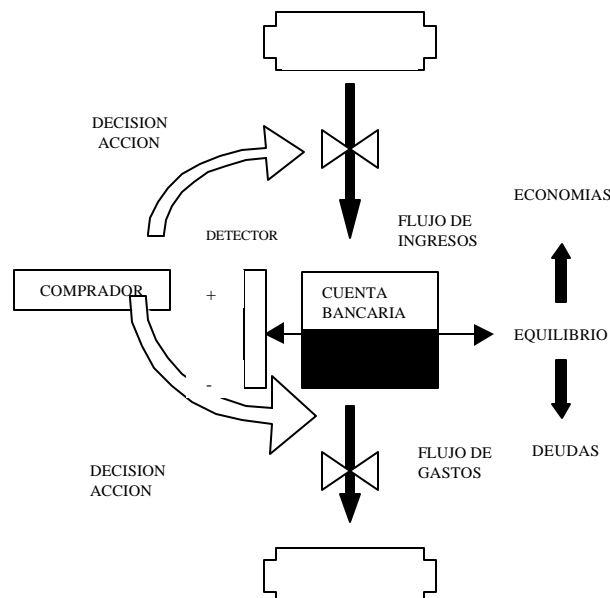
Los ejemplos hidráulicos son, evidentemente, los más cómodos. La variable de flujo es el caudal (cantidad media desplazada entre dos instantes). La variable de estado es la cantidad de agua acumulada en la reserva en un momento dado. Si se sustituye el flujo de agua por un flujo de individuos (número de nacimientos por año), la variable de estado es la población en un momento dado.

La diferencia entre variable de flujo y variable de estado se ilustra perfectamente por la diferencia entre la cuenta de explotación y el balance de una empresa. La cuenta de explotación no se expresa más que entre dos instantes (entre el primero de enero y el 31 de diciembre, por ejemplo). Resulta de una agregación de variables de flujo: salarios pagados entre las fechas escogidas, importe de las compras, transportes y desplazamientos, gastos financieros, producto de las ventas. Por el contrario, el balance se expresa a una fecha fija (al 31 de diciembre, por ejemplo). Es una instantánea de la situación de la empresa. El balance está constituido por diferentes variables de estado; en el activo: inmovilizado, stocks, efectos a cobrar, en el pasivo: capital, deudas a largo plazo, efectos a pagar.

Tres ejemplos simples permiten ilustrar las relaciones entre variables de flujo y variables de estado, y deducir algunos de los medios de que se dispone para actuar a diferentes niveles sobre un sistema complejo.

Equilibrar un presupuesto.

Una cuenta en el banco (reserva) se llena o vacía según las entradas y salidas de dinero. El estado o la situación de la cuenta a una fecha dada es la variable de estado. Los salarios e ingresos del titular de esta cuenta representan un flujo monetario expresado en cantidad de dinero por unidad de tiempo. Los gastos corresponden a un flujo de salida. Las «válvulas» de control de estos dos flujos son la culminación de las decisiones tomadas en función del estado de la cuenta.



Equilibrar flujos es hacer que el flujo de ingresos (entrada) iguale al flujo de los gastos (salida). La cuenta del banco se mantiene a un nivel estacionario. Es una situación de equilibrio dinámico⁶.

Cuando el flujo de entrada es superior al de salida, el dinero se acumula en la cuenta. Su titular «ahorra». Puede ahorrar y aumentar así sus ingresos globales por los intereses devengados (bucle de retroalimentación positiva).

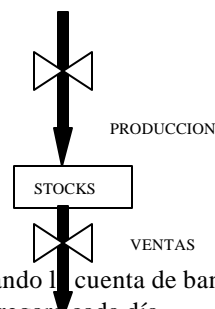
En fin, cuando el flujo de salida es superior al de entrada, se trata obviamente de una situación deudora. Tal situación puede deteriorarse porque los intereses sobre las deudas acrecen el flujo de salida (bucle positivo hacia cero). Si no se pone remedio, éste puede arrastrar, en breve plazo, al agotamiento de las reservas.

La conservación del equilibrio exige, pues, un control muy estricto. Este control se ejerce más fácilmente sobre la válvula de salida (los gastos) que sobre la válvula de entrada (los ingresos), lo que implica la elección de nuevas restricciones: disminución o mejor distribución de los gastos. Por el contrario, para aumentar rápidamente los ingresos, es preciso disponer de reservas (economías). o beneficiarse, por ejemplo, de un aumento de sueldo.

Pílotar una empresa.

El gerente se sirve, a corto plazo, de indicadores internos (ventas, nivel de los stocks, cartera de pedidos, evolución de los márgenes de producción productividad, demoras en entregas, tesorería) y, a plazos más amplios, del balance, de la cuenta de explotación y de indicadores externos: tipo de descuento, mano de obra, crecimiento de la economía. En función de las diferencias entre estos indicadores y las previsiones el gerente adopta las medidas correctoras pertinentes. Veamos dos ejemplos relacionados los stocks y con la tesorería.

Un stock es un depósito alimentado por la producción y vaciado por las ventas. Cuando el nivel de los stocks, es demasiado elevado, al gerente puede decidir actuar sobre el flujo de las ventas, reduciendo, por ejemplo, el precio de venta de los productos, o reforzando la comercialización. También puede, a plazo más inmediato, actuar sobre la válvula de entrada frenando la producción.



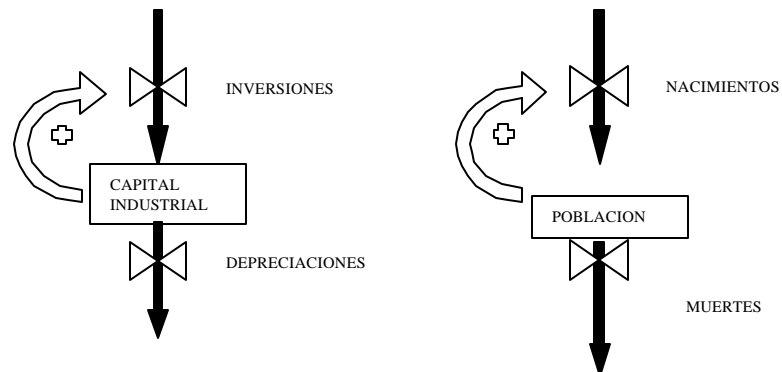
⁶ Este estado de equilibrio se produce aun cuando la cuenta de banco se vacía y se rellena todos los meses. En efecto, podría concebirse que el salario se entregara cada día.

Situación inversa: demanda muy, fuerte. El nivel de los stocks disminuye muy deprisa. El gerente intenta entonces incrementar la producción. Más si la demanda persiste, la empresa, en rotura de stocks, propone plazos de entrega cada vez mayores. Los clientes no quieren esperar y se dirigen a la competencia. La demanda baja, sube el nivel de los stocks: un bucle de retroalimentación negativa viene ahora a ayudar al gerente... o puede que a fastidiarle si ha aumentado excesivamente su producción, sin haber sido capaz de prever esta evolución del mercado. Por esta razón, el gerente debe controlar flujos y niveles teniendo en cuenta retardos y diferentes tiempos de respuesta.

Una de las causas más frecuentes de los problemas de tesorería de las pequeñas empresas se deriva del desfase existente entre la fecha de registro de un pedido, la fecha de facturación y la fecha de recepción de! pago del cliente. Las salidas regulares de dinero (salarios, compras, alquileres) y la irregularidad de los pagos de los clientes crean fluctuaciones de tesorería, atenuadas parcialmente por el descubierto permitido por los bancos a las empresas. Así que este descubierto hace las veces de regulador. Igual que los stocks, como una buena cartera de pedidos o como cualquier otro reservorio: es el efecto tampón o cisterna que nos hemos encontrado en repetidas ocasiones, en particular en el caso de los grandes reservorios de los ciclos ecológicos.

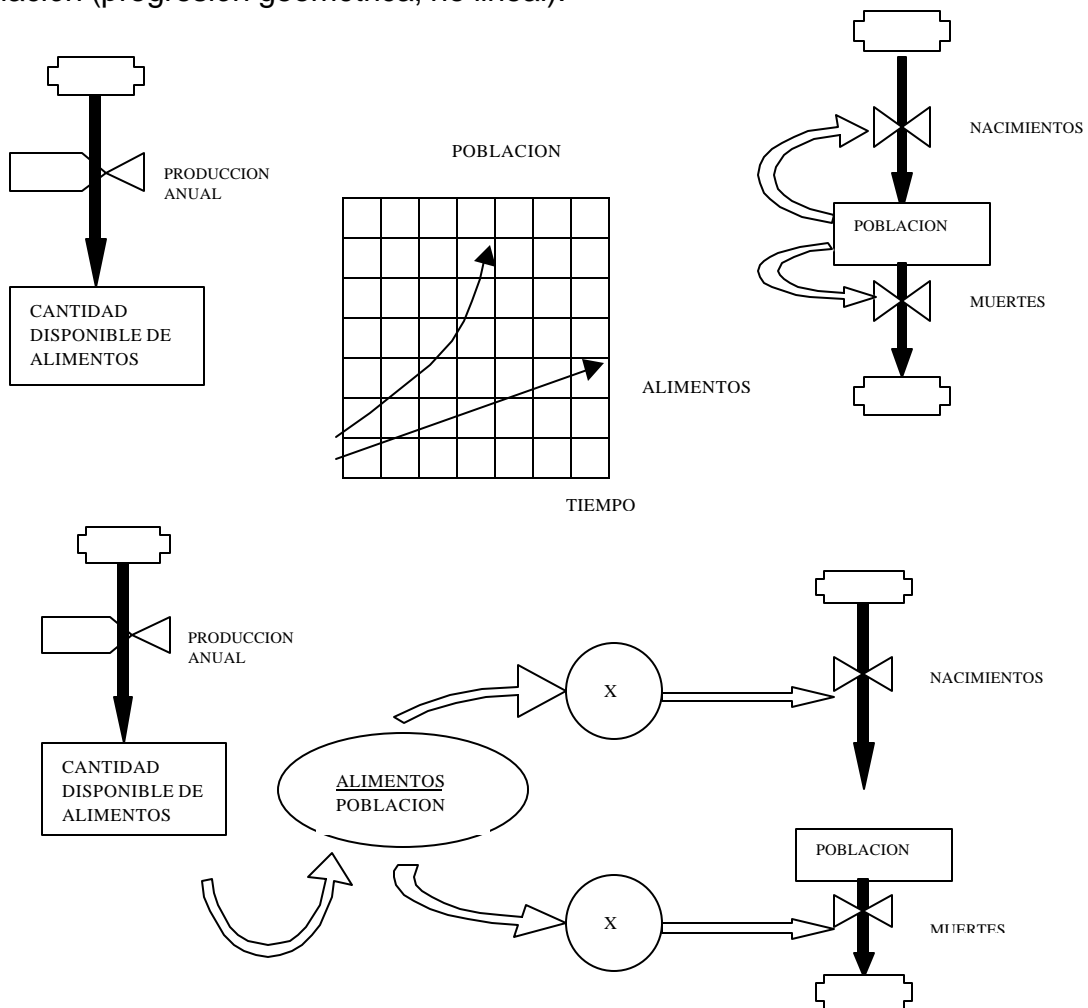
Alimentos y población mundial.

Dos variables principales miden el crecimiento mundial: el capital industrial y la población. El reservorio de capital industrial (fábricas, máquinas, vehículos, bienes de equipo, etc.) se alimenta por las inversiones y se vacía por las depreciaciones (obsolescencia y desgaste del material). El reservorio de la población se alimenta con los nacimientos y se vacía con las muertes.



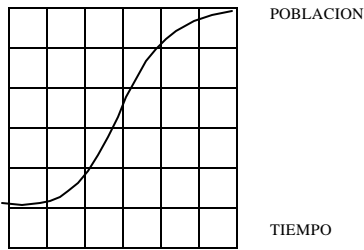
Si el flujo de las inversiones es igual al flujo de depreciación, o si el flujo de natalicios iguala al de decesos, se alcanza un estado de equilibrio dinámico, estado estacionario (y no estático) llamado de crecimiento cero. ¿Qué ocurre cuando interactúan varias variables de estado y varias variables de flujo?

Con un modelo muy sencillo podemos ilustrarlo. Se trata del bien conocido modelo malthusiano, que describo en su forma clásica y simplista: los recursos mundiales de alimentos crecen a una tasa constante (progresión aritmética, lineal), mientras que la población del globo lo hace a una tasa que, a su vez, depende de la población (progresión geométrica, no lineal).



El reservorio «alimento» se llena a velocidad constante; el de la población a una velocidad acelerada. El elemento de regulación está representado (de manera

muy esquemática) por la cantidad de alimentos disponibles por habitante, lo que permite conectar las dos partes del modelo.



La disminución de la ración alimenticia por persona implica la hambruna y, por consiguiente, un auge de la mortalidad. La curva demográfica se estabiliza y presenta la forma de una curva en S, característica de un crecimiento limitado por un factor exterior.

Las ecuaciones correspondientes a las diferentes variables de estado y de flujo puedan programarse en ordenador, a fin de verificar la validez de ciertas hipótesis: ¿qué ocurriría si, se duplicase la tasa de natalidad?, ¿si se redujera a la mitad?, ¿si se duplicase o triplicase la producción de alimentos? La cosa no ofrece, evidentemente, más que un interés muy limitado en un modelo tan rudimentario, pero, cuando se manejan varias centenas de variables, se impone la simulación y ésta aporta, como se verá, resultados preciosos.

4.- ¿Para qué sirve el enfoque sistémico?.

Una revolución en nuestros modos de pensamiento, ciertamente, pero ¿qué aplicaciones prácticas? Más allá de la simple descripción de los sistemas de la naturaleza: un método y reo, de acción. No es otra cosa, como se verá, que el modo de empleo del macroscopio.

Análisis y síntesis.

El enfoque analítico y el enfoque sistémico son más complementario que opuestos. Pero mutuamente irreductibles.

El enfoque analítico pretende reducir un sistema a sus elementos constitutivos más simples, a fin de estudiarlos en detalle y comprender lo tipos de interacción que existen entre ellos. Después, modificando «una variable a la vez», deducir leyes generales que permitan predecir la propiedades del sistema en condiciones muy diferentes. Para que tal predicción sea posible, es preciso que puedan aplicarse las leyes de aditividad de las propiedades elementales. Este es el caso de los sistemas homogéneos, es decir de aquellos que comportan elementos semejantes y presentan interacciones débiles. En este caso, las leyes estadísticas aplican bien y permiten comprender el comportamiento de la multitud, de la complejidad desorganizada.

Las leyes de aditividad de las propiedades elementales no se aplican evidentemente, a los sistemas de elevada complejidad, constituidos por una diversidad muy grande de elementos ligados por fuertes interacciones. Tales sistemas deben ser abordados por métodos nuevos como los que agrupa el enfoque sistémico. Su objetivo: considerar un sistema en su totalidad, su complejidad y su dinámica propia. Gracias a la simulación por ejemplo, se puede «animar» un sistema y observar en tiempo real los efectos de los diferentes tipos de interacciones entre sus elementos. El estudio de su comportamiento en el tiempo conduce a definir las reglas acción cuyo fin es el de modificar el sistema o concebir otros.

Mejor que una descripción punto por punto de las características cada uno de estos dos enfoques, es preferible presentarlas juntas en un cuadro, sin comprometerse ahora en una discusión acerca de sus ventajas inconvenientes respectivos.

Enfoque analítico

Enfoque sistémico

Aísla: se concentra sobre los elementos-

Relaciona: se concentra sobre las interacciones de los elementos.

Considera la naturaleza de las interacciones

Considera los efectos de las interacciones.

Se basa en la precisión de los detalles.

Se basa en la percepción global.

Modifica una variable a la vez.

Modifica simultáneamente grupos de variables.

Independiente de la duración: los fenómenos considerados son reversibles.

Integra la duración y la irreversibilidad.

La validación de los hechos se realiza por la prueba experimental en el marco de una teoría.

La validación de los hechos se realiza por comparación del funcionamiento del modelo con la realidad.

Modelos precisos y detallados, aunque difícilmente utilizables en la acción (ejemplo: modelos econométricos).

Modelos insuficientemente rigurosos para servir de base a los conocimientos, pero utilizables en la decisión y en la acción (ejemplo: modelos del Club de Roma).

Enfoque eficaz cuando las interacciones son lineales y débiles.

Enfoque eficaz cuando las interacciones son no lineales y fuertes.

Conduce a una enseñanza por disciplinas (yuxta-disciplinaria). Conduce a una enseñanza pluri-disciplinaria.

Conduce a una acción programada en sus detalles. Conduce a una acción por objetivos.

Conocimiento de los detalles, objetivos mal definidos. Conocimiento de los objetivos, detalles borrosos.

Este cuadro, útil por su simplicidad, no representa de hecho sino una caricatura de la realidad. Esta representación, dualista en exceso, encierra el pensamiento en una alternativa que parece difícil traspasar. Podrían mencionarse otros muchos puntos de comparación. Sin ser exhaustivo, este cuadro tiene la ventaja de situar dos enfoques complementarios, de los que uno (enfoque analítico) ha sido favorecido de forma casi desproporcionada en toda nuestra enseñanza.

A la oposición entre analítico y sistémico, se añade la oposición entre visión estática y Visión dinámica.

Nuestro conocimiento de la naturaleza y las grandes leyes científicas se apoyan sobre lo que yo llamaría el «pensamiento clásico», cuyas tres principales características son las siguientes:

- Sus conceptos se han formado a imagen de lo «sólido» (conservación de la forma, conservación del volumen, efectos de las fuerzas, relaciones espaciales, dureza, solidez).

- El tiempo irreversible, el de la duración vivida, de lo no determinado, de lo aleatorio, no se tiene nunca en cuenta. Sólo prima el tiempo de la física y de los fenómenos reversibles. T puede transformarse en - T sin que los fenómenos estudiados tengan que ser modificados.

- Por último, la única forma de explicación de los fenómenos es la causalidad lineal; es decir, el modo de explicación que se apoya en una cadena lógica de causas y de efectos, extendida, en toda su dimensión, a largo de la flecha del tiempo.

causa → efecto
antes → después

En el pensamiento actual, influenciado por el enfoque sistémico, noción de fluido sustituye a la de sólido. Lo moviente sustituye a permanente. Flexibilidad y adaptabilidad reemplazan a rigidez y estabilidad. Las nociones de flujo y de equilibrio de flujos se añaden a las fuerzas y de equilibrios de fuerzas. La duración y

la irreversibilidad entran como dimensiones fundamentales en la naturaleza de los fenómenos. La causalidad se hace circular y se abre sobre la finalidad⁷.

La dinámica de los sistemas hace estallar la visión estática de las organizaciones y de las estructuras. Integrando el tiempo, hace surgir relacional y el devenir.

De nuevo un cuadro, para presentar, esclarecer y enriquecer los conceptos más importantes asociados al «pensamiento clásico» y «pensamiento sistémico»:

Modelos y simulación herramientas básicas.

La creación de modelos y la simulación se cuentan entre los métodos más profusamente utilizados por el enfoque sistémico, hasta tal punto que para muchos constituyen aquellos lo esencial de éste.

Confrontados a la complejidad y a la interdependencia, todos utilizamos modelos analógicos simples. Estos modelos, establecidos a partir de un análisis previo, intentan reunir los principales elementos de un sistema para permitir hipótesis sobre su comportamiento global; y teniendo en cuenta, de la mejor manera posible, la interdependencia de los factores.

En presencia de un reducido número de variables, empleamos constantemente tales modelos analógicos: para comprender un sistema sobre el que se poseen pocas informaciones; o para tratar de prever las respuestas o las reacciones de una persona que tenga un modelo diferente de la situación. Nuestra visión del mundo es un modelo. Toda imagen mental es un modelo, borroso e incompleto, pero que sirve de apoyatura a las decisiones.

La construcción de modelos analógicos simples se hace enseguida impracticable en cuanto que un mayor número de variables entra en juego.

Este es el caso de los sistemas de elevada complejidad. Es necesario entonces, utilizar medios mecánicos o electrónicos, como simuladores o computadores. Ahí es donde intervienen la construcción de modelos matemáticos y la simulación

La simulación intenta «hacer vivir» un sistema, permitiendo el juego cerebral sin la asistencia de la informática o de aparatos de simulación. La simulación se apoya en un modelo, establecido éste a partir de un análisis previo. Análisis de sistema, modelación y simulación constituyen así las tres etapas fundamentales del estudio del comportamiento dinámico de los sistemas complejos:

⁷ Sobre numerosos puntos mencionados aquí volveremos en los próximos capítulos.

El análisis de sistemas consiste en definir los límites del sistema a modelar; en identificar los elementos importantes y los tipos de interacciones entre estos elementos; después, en determinar los enlaces que los integran en un todo organizado. Elementos y tipos de enlaces son clasificados y jerarquizados. Después se resaltan e identifican las variables de flujo, las variables de estado, los bucles de retroalimentación positivos y negativos, los retardos, las «fuentes» y los «sumideros». Se considera por separado cada bucle y se evalúa su influencia en el comportamiento de los diferentes subconjuntos del sistema.

La modelación consiste en construir un modelo a partir de los datos de los datos del análisis de sistemas. Primeramente se establece un esquema completo de las relaciones causales entre los elementos de los diferentes subsistemas (por ejemplo, en el modelo malthusiano, de la página 96: influencia de la natalidad. etc.). Después, se expresan en un lenguaje apropiado de programación las ecuaciones descriptivas de las interacciones y enlaces entre los diferentes elementos del sistema.

Por último, la simulación estudia el comportamiento temporal de un sistema complejo. En lugar de modificar «una variable a la vez», emplea un computador para hacer variar simultáneamente grupos de variable, que es lo que acontece en la realidad. También puede utilizarse un simulador, que es un modelo físico interactivo, dando en «tiempo real» una respuesta a las distintas decisiones y acciones del usuario. Tal es el caso de los simuladores de vuelo utilizados por los alumnos pilotos.

Hoy se utiliza la simulación en un gran número de campos, gracias a unos lenguajes de simulación a la vez más potentes y más simples. Gracias también al empleo de nuevos medios de comunicación con el ordenador (salida gráfica sobre pantalla catódica, tablas trazadoras rápidas lápices de introducción de datos, o dibujos animados automáticos bajo control del ordenador). Algunos ejemplos mostrarán la diversidad de las aplicaciones:

Economía y política: opciones económicas del plan; simulación de conflictos; «modelos del mundo». Administración de empresas: política de marketing; penetración en un mercado; lanzamiento de un nuevo producto. Ecología: efectos de los contaminantes atmosféricos; concentración de los contaminantes en la cadena alimentaria. Urbanismo: crecimiento de las ciudades; degeneración de los barrios; tránsito de vehículos. Astrofísica: génesis y evolución de las galaxias; «experiencias» realizadas en la atmósfera de un planeta lejano. Física: estudio del flujo de electrones en un semiconductor; resistencia de los materiales, onda de choque; desplazamiento de los fluidos; formación de las ondas. Obras públicas: enarenamiento de los puertos; efecto de los vientos sobre las construcciones elevadas. Química: simulación de reacciones químicas; estudio de la estructura de las moléculas. Biología: circulación por los capilares; crecimiento competitivo entre poblaciones bacterianas; efectos de medicamentos; genética de las poblaciones. Informática: simulación del funcionamiento de un ordenador antes de construirlo.

Investigación operativa; problemas de colas de espera, de optimación, de asignación de recursos, de ordenación. Ingeniería: control de procesos; cálculo del coste de edificios. Educación: juegos pedagógicos de simulación; juegos de empresa

Límites y ventajas de la simulación.

Pese al número y a la diversidad de estas aplicaciones es preciso no esperar demasiado de la simulación. No es más que una aproximación entre otras, un método complementario de estudio de un sistema complejo. La simulación no da nunca el óptimo, o la solución exacta de un problema planteado. No hace otra cosa que desgajar las tendencias generales del comportamiento de un sistema, sus direcciones probables de evolución, sugiriendo al tiempo nuevas hipótesis.

Uno de los más serios peligros de la simulación procede de la libertad de acción del usuario: se cambian las condiciones iniciales «para ver». Pero se corre el riesgo de perderse en la infinidad de variables y de comportamientos incoherentes asociados a estas modificaciones «aleatorias». Los resultados de la simulación no deben ser confundidos con la realidad, como ocurre a menudo. Sino comparados con lo que se sabe de la realidad, para servir de base a una eventual modificación del modelo de partida. Es a continuación de tal proceso iterativo, por aproximaciones sucesivas, cuando se revela la utilidad de la simulación.

La simulación se muestra efectivamente como una de las herramientas más fecundas del enfoque sistémico. Permite comprobar los efectos de un gran número de variables sobre el funcionamiento global de un sistema. Jerarquizar el papel de cada variable. Detectar los puntos de amplificación o de inhibición, gracias a los que puede influenciarse el comportamiento de este sistema. El usuario puede poner a prueba diferentes hipótesis sin arriesgarse a destruir el sistema que estudia, lo que es particularmente importante en el caso de sistemas vivos o de sistemas frágiles o muy costosos.

Dado que se efectúan experiencias sobre un modelo de la realidad y no sobre la propia realidad, puede actuarse sobre la variable tiempo: acelerar fenómenos muy lentos (fenómenos sociales, por ejemplo); o, al contrario, decelerar fenómenos ultrarrápidos (impacto de un proyectil sobre una superficie). Asimismo puede actuarse sobre la variable espacio, simulando interacciones ocurrientes en volúmenes muy reducidos o sobre grandes distancias.

La simulación no extrae del computador, como por arte de magia, «más» de lo que se ha puesto en el programa. La aportación del ordenador se sitúa a un nivel cualitativo. Procesando millones de datos en una ínfima fracción de tiempo, revela estructuras, modalidades, tendencias anteriormente inobservables y que resultan de la dinámica propia del sistema.

La interacción entre usuario y modelo desarrolla la intuición de las interdependencias y permite prever mejor las reacciones del modelo. Esta intuición existe, obviamente, en todos aquellos que acumulan una larga experiencia en la gestión de organizaciones complejas. Pero una de las ventajas de la simulación es la de permitir la adquisición más rápida de estos mecanismos fundamentales.

En fin, la simulación representa una nueva herramienta de ayuda a la decisión. Permite efectuar elecciones entre futuros posibles. Aplicada a los sistemas sociales no es directamente predictiva. ¿De qué manera tener en cuenta datos no cuantificables como el bienestar, el miedo, el deseo o reacciones afectivas? Sin embargo, constituye una especie de «laboratorio sociológico portátil» con el que es posible realizar experiencias; sin comprometer el porvenir de millones de individuos y sin consumir recursos importantes en programas que a menudo conducen a fracasos.

Ciertamente, los modelos aún son imperfectos. Pero, como puntualizadas DENNIS MEADOWS, frente a ellos no se encuentran sino «modelos mentales» contruidos partiendo de elementos parcelarios y de procesos intuitivos. Generalmente sobre estos últimos modelos es donde se apoyan las grandes decisiones políticas.

Un extraño comportamiento.

Las propiedades y el comportamiento de un sistema complejo s determinados por su organización interna, y por sus relaciones con su entorno. Comprender mejor estas propiedades, prever mejor estos comportamientos, es disponer de medios para actuar sobre este sistema transformándolo u orientando su evolución.

Todo sistema presenta dos modos fundamentales de existencia y de funcionamiento: la conservación o el cambio. El primero reposa sobre los bucles de retroalimentación negativos y se caracteriza por la estabilidad. El segundo sobre los bucles positivos y se caracteriza por el crecimiento (o el declive). La coexistencia de estos dos modos en el seno de un sistema abierto, sometido permanente a las perturbaciones aleatorias de su entorno, crea toda una serie de comportamientos característicos. Pueden resumirse los principales en una serie de gráficas simples, tomando como variable cualquier magnitud característica del sistema en función del tiempo* (dimensión, producción, cifra de negocios, número de elementos, etc).

La dinámica de la conservación.

La escalabilidad dinámica: el equilibrio en el movimiento

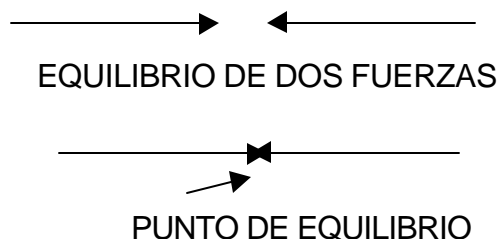
* No hay que olvidar que un comportamiento global es el resultante de los comportamientos individuales de los subsistemas, comportamientos a su vez determinados por la interconexión de un número elevado da variables.

Conservarse significa durar. Las regulaciones negativas, controlando las divergencias de los bucles positivos, contribuyen a estabilizar un sistema y a permitirle durar. El sistema es capaz de autorregulación.

Aproximar estabilidad y dinámica puede parecer paradójico. En realidad, esta aproximación expresa el hecho de que las estructuras o las funciones de un sistema abierto se conserva idénticas pese a la continua renovación de los componentes del sistema. Esta persistencia de forma es la estabilidad dinámica. Se la encuentra en la célula, en el organismo vivo, o en la llama de una vela.

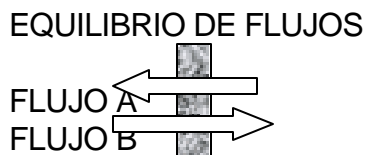
La estabilidad dinámica resulta de la combinación y del reajuste de numerosos equilibrios alcanzados y mantenidos por el sistema. Como el equilibrio del «medio interior» del organismo, por ejemplo (véase página 55). Se trata, pues, de equilibrios dinámicos. Lo que impone una distinción previa entre equilibrio de flujos.

Un equilibrio de fuerzas resulta de la anulación de un mismo punto de dos o varias fuerzas iguales y opuestas. Puede ilustrarse de dos manos inmovilizadas en un «pulso», o por una bola en el fondo de una cubeta.



Cuando existen dos masas en presencia (dos ejércitos o dos potencias), se habla también de «equilibrio de fuerzas». Más un equilibrio de fuerzas es un equilibrio estático. No es posible modificar si no es por un cambio discontinuo de la relación entre las fuerzas. Tal discontinuo puede llevar, cuando una fuerza supera a la otra, a una «escalada».

Por el contrario, un equilibrio de flujos resulta del ajuste de las velocidades de dos o varios flujos que atraviesan un aparato de medida. Hay equilibrio cuando las velocidades de los flujos son iguales y de direcciones opuestas**. Es el caso de una transacción en un comercio (mercancía contra dinero).



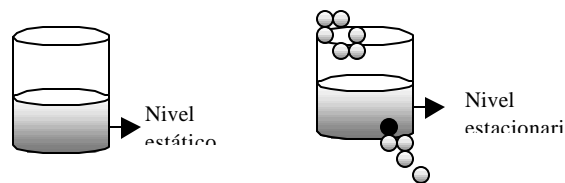
** O cuando los flujos tienen un efecto opuesto, aun cuando vayan en la misma dirección (depósito que se llena y se vacía al mismo tiempo)

MEDIDA

Un equilibrio de flujos es un equilibrio dinámico. Puede adaptarse, modificarse y modularse permanentemente gracias a reajustes a veces imperceptibles, en función de las perturbaciones o de las circunstancias. El equilibrio de flujos es el fundamento de la estabilidad dinámica.

Cuando se alcanza el equilibrio, un cierto «nivel» se mantiene constante en el transcurso del tiempo (concentración de determinadas moléculas en el plasma, o estado de una cuenta en banco (véase página 92)). A este estado particular se le denomina un estado estacionario representado por el nivel del agua de un depósito incomunicado con el exterior.

Existe una infinidad de estados estacionarios, como existe una infinidad de niveles de equilibrio a diferentes alturas del depósito. Es lo que permite a un sistema abierto adaptarse y responder a la enorme variedad de las modificaciones del entorno.



La homeóstasis: la resistencia al cambio.

Es una de las más notables y características propiedades de los sistemas abiertos de elevada complejidad. El vocablo de homeóstasis fue creado por el fisiólogo americano WALTER B. CANNON en 1932. Un sistema homeostático (una empresa, una gran organización, una célula) es un sistema abierto que conserva su estructura y sus funciones por intermedio de una multiplicidad de equilibrios dinámicos. Equilibrios rigurosamente controlados por mecanismos de regulación interdependientes. Un sistema así reacciona a todo cambio proveniente del entorno, o a toda perturbación aleatoria, por una serie de modificaciones de igual valor y de dirección opuesta a las que lo han generado: estas modificaciones persiguen el mantenimiento de los equilibrios internos.

Los sistemas ecológicos, biológicos o sociales son particularmente homeostáticos. Se oponen al cambio por todos los medios a su disposición. Si el sistema no consigue establecer sus equilibrios, entra entonces en otro modo de funcionamiento con restricciones cada vez más draconianas que las precedentes, y que pueden llevar, si prosiguen las perturbaciones, a la destrucción del conjunto.

La homeóstasis se presenta, pues, como una condición esencial de la estabilidad -y, por consiguiente, de la supervivencia- de los sistemas complejos.

Pero también les confiere propiedades muy particulares. Los sistemas homeostáticos son ultraestables: toda su organización interna, estructural, funcional, contribuye al mantenimiento de esa misma organización. Su comportamiento es imprevisible; contraintuitivo según la expresión de JAY FORRESTER, o contravariante: cuando después de una acción precisa se espera una determinada reacción, lo que se obtiene en realidad es un resultado completamente inesperado y a menudo contrario a las previsiones. Tales son los Juegos de la interdependencia Y de la homeóstasis. Los hombres políticos, los gerentes y los sociólogos conocen muy bien sus efectos.

La dinámica del cambio.

Para un sistema complejo, durar no basta: es preciso adaptarse también a las modificaciones del entorno y evolucionar. De otro modo, las agresiones exteriores no tardan en desorganizarlo y destruirlo. La paradójica situación con que se enfrenta cualquier responsable mantenimiento y de la evolución de un sistema complejo (Estado, gran organización, empresa) se resume mediante esta simple pregunta: «¿Cómo puede una organización estable, cuya finalidad es conservarse y durar, cambiar y evolucionar?»

Crecimiento y variedad.

El crecimiento de un sistema complejo -en volumen, en tamaño, en número de elementos - depende de los bucles de retroalimentación positivos y de almacenamiento de energía. Efectivamente, un bucle de retroalimentación positiva, actuando siempre en el mismo sentido, conduce al aumento acelerado de una magnitud dada. Tal magnitud puede ser el número (crecimiento de una población), la diversidad (variedad de los elementos de las interacciones entre estos elementos), la energía (excedente energético, acumulación de los beneficios, aumento del capital).

El bucle de retroalimentación positiva es equivalente a un generador aleatorio de variedad. Amplifica la menor divergencia. Acrece las posibilidades de elección; acentúa la diferenciación, y genera complejidad multiplicando las posibilidades de interacción.

Variedad y complejidad están estrechamente conectadas. Pero la variedad es también una de las condiciones de la estabilidad de un sistema. En efecto, la homeóstasis no puede establecerse y mantenerse si no es gracias a una gran variedad de regulaciones. Cuanto más complejo es sistema más debe serlo correspondientemente el sistema de control, a fin de ofrecer una «respuesta» a las múltiples perturbaciones provenientes del entorno. Esto es lo que expresa la «ley de la variedad requerida» (Law of Requisite Variety) propuesta por Ross ASHBY en

* Retroalimentación positiva, pág. 89

1958. Esta ley, extremadamente general, establece de forma matemática que la regulación de un sistema no es eficaz si no se apoya en, un sistema de control tan complejo como el propio sistema. Dicho de otra manera, se necesita que las acciones de control posean una variedad igual a la variedad del sistema. En ecología por ejemplo, es la variedad de las especies, el número de «nichos» ecológicos, la riqueza de las interacciones entre especies, y entre comunidad y entorno, lo que asegura la estabilidad y el mantenimiento de esta comunidad. La variedad permite presentar una gama muy amplia de respuestas a las formas posibles de agresiones del entorno.

La generación de la variedad puede, pues, conducir a adaptaciones por aumento de complejidad. Más, por confrontación con lo aleatorio del entorno, genera también lo imprevisto, que es la savia del cambio. Así que el crecimiento es simultáneamente motor del cambio y medio para adaptarse a las modificaciones del entorno. De este modo se entrevé el camino por el que puede evolucionar un sistema homeostático, construido para resistir al cambio. Evoluciona en virtud de un proceso complementario de desorganización (total o parcial) y de reorganización. Este se produce, ya en el transcurso del enfrentamiento del sistema con las perturbaciones aleatorias provenientes del entorno (mutaciones, sucesos, «ruidos»), ya en el curso del reajuste de un desequilibrio resultante, por ejemplo, de un crecimiento demasiado rápido.

Evolución y emergencia.

Los sistemas vivos pueden adaptarse (dentro de ciertos límites) a modificaciones brutales acaecidas en el mundo exterior. Poseen, en efecto, detectores y comparadores que les permiten captar señales provenientes del exterior o del interior, y comparar estas señales con valores de equilibrio. Cuando se producen divergencias, la emisión de señales de error permite corregirlas. Si no puede alcanzar su antiguo estado de equilibrio homeostático, el sistema busca, por el juego complementario de los bucles nuevos puntos de equilibrio y nuevos estados estacionarios.

La evolución de un sistema abierto es la integral de estos cambios y de estas adaptaciones^{**}. El apilamiento, a lo largo del tiempo, de los planos sucesivos o de las «etapas» de su historia. Esta evolución se materializa por niveles jerárquicos de organización y por la emergencia de propiedades nuevas. La evolución prebiológica (la génesis de los sistemas vivos), la evolución biológica y la evolución social son ejemplos de evolución hacia niveles de creciente complejidad. A cada nivel «emergen» propiedades nuevas, que no pueden explicarse por la suma de las propiedades de cada una de las partes que constituyen el todo. Hay salto cualitativo; se franquea un umbral: la vida, el pensamiento reflexivo, la conciencia colectiva.

^{**} Los mecanismos de la evolución se abordan en el capítulo 5

La propiedad de emergencia va ligada a la complejidad. El aumento de la diversidad de los elementos, el del número de enlaces entre estos elementos y el juego de interacciones no lineales conducen a comportamientos difícilmente predecibles. Sobre todo, si uno se funda exclusiva propiedades de cada uno de los aminoácidos que componen la cadena de las proteínas. Pero, a causa de las espirales de esta cadena, algunos aminoácidos, alejados en su orden de sucesión, se encuentran, no obstante, próximos en el espacio. Esto confiere a la proteína propiedades emergentes: reconocer ciertas moléculas y catalizar su transformación. Lo que es imposible cuando los ácidos aminados están presentes en el medio, pero no unidos en el orden requerido, o cuando la cadena está desplegada.

Los «diez mandamientos» del enfoque sistémico.

El enfoque sistémico no tiene interés más que cuando desemboca en lo operativo. Favoreciendo la adquisición de los conocimientos y permitiendo mejorar la eficacia de nuestras acciones.

Consiguientemente debe permitir segregar, a partir de los invariantes, de las propiedades y del comportamiento de los sistemas complejos, algunas reglas generales destinadas a comprender mejor y actuar sobre estos sistemas.

Por diferencia con las reglas jurídicas, morales, o incluso fisiológicas, con las que aún puede trampearse, un desconocimiento de algunas reglas sistémicas básicas puede implicar graves errores, y a veces conducir a la destrucción del sistema en el que uno se encuentra y sobre el que se intenta actuar. Ni qué decir tiene que numerosas personas, poseen un conocimiento intuitivo de estas reglas, muchas de las cuales se derivan de la experiencia o del simple sentido común. He aquí los «diez mandamientos» del enfoque sistémico:

1. Conservar la variedad.

Para conservar la estabilidad se hace necesario conservar la variedad. Cualquier simplificación es peligrosa porque introduce desequilibrios. Abundan los ejemplos en ecología: la desaparición de determinadas especies, como consecuencia de los impresionantes, progresos de la civilización», supone la degradación de todo un ecosistema. En ciertas regiones, la agricultura intensiva destruye el equilibrio de la pirámide ecológica y la sustituye por un equilibrio inestable, formado por tres etapas solamente (los cereales, los bovinos, el hombre) colocados bajo el control de una sola especie dominante. Este ecosistema desequilibrado busca espontáneamente volver a un estado de complejidad mayor, por la proliferación de insectos y de malas hierbas, cosa que impiden los agricultores a golpe de pesticidas o herbicidas.

En economía y en gestión, cualquier centralización excesiva implica una simplificación de los canales de comunicación y un empobrecimiento de las

interacciones entre individuos. Lo que introduce el desorden, el desequilibrio y la inadaptación a situaciones rápidamente cambiantes.

2. No «abrir» bucles de regulación.

El aislamiento de un factor lleva a acciones puntuales cuyos efectos suelen desorganizar el conjunto del sistema. Es la causa de errores, a veces dramáticos, en medicina, en economía o en ecología.

Para obtener una acción a corto plazo, muy a menudo se «corta» un bucle de estabilización, o un conjunto imbricado de bucles de retroalimentación. Así se cree actuar directamente sobre las causas con objeto de controlar mejor los efectos.

Es lo que ocurre en la ruptura de los cielos naturales. El empleo masivo de combustibles fósiles, de abonos químicos o de pesticidas-no reciclables, permite aumentar el rendimiento agrícola por un corto período. Más, a largo plazo, esta acción corre el riesgo de provocar perturbaciones irreversibles.

Un ejemplo célebre: la lucha contra los insectos provoca igualmente la desaparición de los pájaros que de ellos se alimentan. Resultado a corto plazo: un retorno potente de los insectos... pero sin los pájaros.

Otro ejemplo: los estados de vela, de sueño y de ensoñación son regulados muy probablemente por la sutil relación de mediadores químicos existentes en el cerebro. Aportando regularmente del exterior, en una finalidad de acción a corto plazo, una molécula extraña, como puede ser un somnífero, se inhiben, a más largo plazo, mecanismos naturales. Peor aún, se incurre en el riesgo de desajustarlos de forma casi irreversible: es preciso hacer sufrir una verdadera cura de desintoxicación a las personas habituadas al uso de barbitúricos para hacerles recuperar un sueño normal.

3. Buscar los puntos de amplificación.

El análisis de sistemas y la simulación permiten poner de manifiesto los puntos sensibles de un sistema complejo. Actuando a este nivel, se desencadenan amplificaciones o inhibiciones controladas. Se actúa sobre las «ganancias», como dicen los especialistas en electrónica.

Un sistema homeostático se resiste a toda medida puntual o secuencial (consistente en esperar los resultados de las medidas anteriores para adoptar otras nuevas). Uno de los métodos que permiten influir en él y hacerlo evolucionar en una dirección escogida consiste en aplicar una combinación de medidas (policy mix). Tales medidas deben dosificarse cuidadosamente entre sí e involucrar simultáneamente diferentes punto de influencia.

Un ejemplo: el problema de los desechos sólidos.

Se ve que, para reducir el flujo de generación de desechos sólidos actuando sobre la válvula (la variable de flujo), no hay más que tres medios: reducir el número de productos utilizados (lo que implicaría una disminución del nivel de vida), reducir la cantidad de desechos sólidos en cada producto; aumentar la duración de vida de los productos haciéndolos más robustos o más fáciles de reparar. Las simulaciones efectuadas por JORGAN RANDERS, del MIT, muestran que ninguna de estas medidas basta por sí sola. Los mejores resultados se obtienen por una combinación de medidas que simultáneamente ponen en juego: una tasa de 25 por 100 sobre la extracción de recursos no renovables; una subvención de 25 por 100 al reciclaje, un aumento de 50 por 100 de la duración de los productos; una duplicación de la fracción reciclable por producto y una reducción de materia bruta por producto.

4. Restablecer los equilibrios por la descentralización.

El restablecimiento rápido de los equilibrios exige que se detecten las divergencias en los lugares mismos en que se producen y que se efectúe la acción correctora de manera descentralizada.

La corrección del equilibrio del cuerpo en la posición vertical se realiza por la contracción de ciertos músculos y sin que tengamos necesidad de pensar constantemente en ello, aun cuando intervenga el cerebro. Las regulaciones enzimáticas muestran que toda la jerarquía de los niveles de complejidad interviene en el restablecimiento de un equilibrio. Muy frecuentemente, la acción correctora se realiza antes incluso que haya sido necesario ascender a los centros superiores de decisión. La descentralización del restablecimiento de los equilibrios es una de las aplicaciones de la ley de la variedad requerida. Es de regla en el organismo, la célula o el ecosistema. Pero, hasta el presente, no parece que hayamos conseguido aplicarla en las organizaciones que nos vemos en la necesidad de gestionar.

5. Saber mantener restricciones.

Un sistema abierto complejo puede funcionar según diferentes modos. Algunos son deseables, otros conducen a la desorganización del sistema. Si se quiere mantener un comportamiento dado, estimado preferible a otro, es preciso aceptar e incluso mantener determinados tipos de restricciones a fin de impedir al sistema derivar hacia un modo de funcionamiento menos deseable, o incluso peligroso.

En la gestión de un simple presupuesto familiar, puede elegirse el modo de «tren de vida elevado» (se vive por encima de sus medios), con las situaciones que esto supone de cara a los bancos o a los acreedores. O, al contrario, elegir limitar

sus gastos y privarse, por consiguiente, de bienes que uno gustaría poseer. Nuevas restricciones.

En el caso de la conducción de la economía de un país, los responsables de la política económica escogen y mantienen las ligaduras debidas a la inflación, con su cortejo de injusticias y desigualdades sociales, calificadas como un mal menor frente a las que engendraría al paro.

Al nivel de la economía mundial, la carrera por el crecimiento supone desigualdades sociales, agotamiento de los recursos y polución. Pero, teóricamente, permite una elevación más rápida del nivel de vida. El paso a una economía «estacionaria» implicaría la elección de nuevas restricciones, basadas ahora en privaciones y en la reducción del nivel de vida. El empleo de medios de control y de regulación más complejos, más delicados y más descentralizados que en una economía de crecimiento. Medios que exigirían de cada ciudadano una mayor responsabilidad.

La libertad y la autonomía no se obtienen más que a través de la elección y dosificación de las restricciones: querer eliminarlas a toda costa supone pasar de un estado constrictivo, aunque aceptado y dominado, a un estado incontrolable conducente con rapidez a la destrucción del sistema

6. Diferenciar para integrar mejor.

Cualquier integración real se funda en una previa diferenciación. La originalidad, el carácter único de cada elemento se revela en la totalidad organizada. Es lo que expresa la célebre frase de TEILHARD DE CHARDIN: «la unión diferencia». Esta ley de la unión «personalizante» se ilustra por la especialización de las células en los tejidos o de los órganos en el cuerpo.

Más no hay unión verdadera sin antagonismo, relación de fuerzas, conflictos. Lo Homogéneo, la mezcla, el sincretismo, es la entropía. Sólo la unión en la diversidad es creadora. Ella aumenta la complejidad, conduce a niveles más elevados de organización. Esta ley sistémica y las ligaduras correspondientes son bien conocidas de aquellos cuya misión es reunir, ensamblar, federar. Los antagonismos y los conflictos se generan siempre en el paso a una entidad englobadora. Antes de agrupar las diversidades ¿hasta qué límites debe llevarse el proceso de personalización? Demasiado pronto: mezcla homogeneizadora y paralizante. Demasiado tarde: enfrentamiento de los individualismos y de las personalidades, y quizá una disociación aun más acentuada que la que existía anteriormente.

7. Para evolucionar, dejarse agredir.

Un sistema homeostático (ultraestable) no puede evolucionar más que si se ve «agredido» por sucesos procedentes del mundo exterior. Por consiguiente, una organización debe ser capaz de captar estos gérmenes de cambio y de emplearlos en su evolución. Lo que obliga a adoptar un modo de funcionamiento caracterizado por una renovación de las estructuras y por una gran movilidad de los hombres y de las ideas. En efecto, cualquier rigidez, esclerosis, perennidad de las estructuras o de la jerarquía es, evidentemente, opuesta a una situación favorable a la evolución.

Una organización puede mantenerse a la manera de un cristal o de una célula viva. El cristal conserva su estructura gracias al equilibrio de fuerzas que se anulan en cada nudo de la red cristalina. Gracias también a la «redundancia», esto es, a la repetición de los mismos motivos. Este estado estático, cerrado frente al exterior, no le permite resistir a las perturbaciones del medio: si la temperatura aumenta, el cristal se desorganiza y funde. La célula, al contrario, está en equilibrio dinámico con su entorno. Su organización no se funda en la redundancia sino en la variedad de sus elementos. Sistema abierto, se mantiene por la continua renovación de sus elementos. Son esta variedad y esta movilidad las que permiten la adaptación al cambio.

La organización-cristal difícilmente evoluciona: lo hace bajo las sacudidas de reformas radicales y traumatizantes. La organización-célula busca favorecer el acontecimiento, la variedad, la apertura al mundo exterior. No teme a una desorganización pasajera, condición para una readaptación más eficaz. Admitir este transitorio riesgo es aceptar y querer el cambio. Ya que no hay cambio real sin riesgo.

8. Preferir los objetivos a la programación minuciosa.

Fijación de los objetivos y control rigurosos, contra una programación detallada de cada etapa: es lo que diferencia un servomecanismo de una máquina automática de mando rígido. El programa de la máquina automática debe prever todas las perturbaciones susceptibles de presentarse sobre la marcha. El servomecanismo se adapta a la complejidad: basta fijar sin ambigüedad el objetivo y emplear los medios de control convenientes para corregir dinámicamente las divergencias.

Estos principios básicos de la cibernética se aplican a toda organización humana. La definición de los objetivos, los medios adecuados y la determinación de los plazos importan más que la programación minuciosa de acciones cotidianas. Una programación detallada puede ser asfixiante. Una programación autoritaria deja poco sitio a la imaginación y a la participación. Lo importante es llegar a la meta. Cualesquiera que sean los caminos recorridos. A condición, desde luego, de no desbordar unos límites bien definidos: recursos necesarios o duración total asignada a las operaciones.

9. Saber utilizar la energía de mando.

Las informaciones emitidas por un centro de decisión pueden multiplicarse en proporciones muy importantes. Sobre todo cuando son recuperadas y amplificadas por las estructuras jerárquicas de las organizaciones o por las redes de difusión.

En el plano energético, el metabolismo del conductor de una máquina es despreciable en comparación con las fuerzas que puede desencadenar y controlar. Lo mismo ocurre con un gerente o con cualquier responsable de una gran organización.

En el plano energético el metabolismo del conductor de una máquina es despreciable en comparación con las fuerzas que puede desencadenar y controlar. Lo mismo ocurre con un gerente o con cualquier responsable de una gran organización.

Es necesario, pues, distinguir entre energía de fuerza y energía de mando. La energía de fuerza es la línea eléctrica y la corriente que caldea una resistencia; o la canalización de agua que produce presión en un punto dado. La energía de mando se traduce por la acción del termostato o del grifo: es información.

Un servomecanismo distribuye por sí mismo su energía de mando. Reparte las informaciones que gobiernan sus órganos de acción. Análogamente, el responsable de una organización debe ayudar al sistema que dirige a repartir su energía de mando. Y, para ello, a construir bucles de retorno de las informaciones a los centros de decisión. En el marco de la empresa o en las estructuras del Estado, estos bucles de regulación se llaman: autogestión, participación o retroalimentación social.

10. Respetar los tiempos de respuesta.

Los sistemas complejos integran la duración en su organización. Cada sistema tiene un tiempo de respuesta que le es propio: en razón de los efectos combinados de los bucles de retroalimentación y de las demoras debidas a las reservas o al correr de los flujos.

En no pocos casos (en particular en la empresa) es inútil, por consiguiente, buscar a toda costa la rapidez de ejecución. Presionar para obtener respuestas, o para recoger un resultado. Vale más intentar comprender la dinámica interna del sistema y prever los retardos en la respuesta. Entrenamiento que se adquiere bastante a menudo en la conducción de las grandes organizaciones: los anglosajones lo llaman el sentido del timing: saber desencadenar una acción, ni demasiado temprano, ni demasiado tarde. sino en el, momento en que el sistema está presto a reaccionar espontáneamente en un sentido o en el otro. El sentido del timing permite sacar -un máximo partido de la energía interna de un sistema

complejo. En vez de imponerle, desde el, exterior, directrices contra las que éste se moviliza.

¿Cómo superar los peligros del enfoque sistémico?.

El interés del enfoque sistémico pasa por su desmistificación. Ya que lo que es útil para la acción cotidiana no debe estar reservado sólo a algunos iniciados. La jerarquía de las disciplinas establecida en el siglo XIX, de las ciencias más «nobles» a las ciencias menos «nobles» (matemáticas y física en la cumbre; ciencias humanas o sociales en lo más bajo de la escala), continúa gravitando fuertemente sobre nuestro enfoque de la naturaleza y sobre nuestra visión del mundo. De ahí, tal vez, ese escepticismo, y hasta desconfianza, frente al enfoque sistémico que se produce en aquellos -matemáticos o físicos- que han recibido la formación teórica más profunda. Por el contrario, aquellos a quienes la naturaleza de su investigación ha habituado a reflexionar en términos de flujo, de transferencia, de intercambio, de irreversibilidad -biólogos, economistas, ecólogos - asimilan de forma más natural las nociones sistémicas y se comunican más fácilmente entre sí.

Para desmistificar más el enfoque sistémico y permitirle establecerse como una actitud interdisciplinaria, un entrenamiento al dominio de la complejidad y de la interdependencia, ¿sería preciso quizá ir hasta rechazar el mismo vocablo de enfoque o de método sistémico? La visión global no está reservada exclusivamente a los grandes responsables, filósofos o sabios. Cualquiera de nosotros puede «adquirir perspectiva». Aprender a mirar a través del macroscopio: para aplicar las reglas sistémicas, construir modelos mentales más rigurosos, y quizá llegar a dominar el juego de las interdependencias.

Más no hay que ocultar los peligros de un empleo demasiado «sistemático» del enfoque sistémico. Un enfoque puramente descriptivo, bajo el único ángulo de lo relacional, lleva rápidamente a una colección inutilizable de modelos de los diferentes sistemas de la naturaleza- La excesiva generalidad de la noción de sistema puede asimismo volverse contra él, destruyendo su fecundidad por una superficialidad esterilizante. También, el uso incontrolado de las analogías, homologías o isomorfismos puede arrastrar a interpretaciones que, en lugar de clarificar, complican. Porque se fundan en semejanzas epidérmicas antes que en principios y leyes fundamentales comunes a todos los sistemas. Según EDGAR MORIN, «demasiada unificación puede convertirse- en abusiva simplificación, luego en idea fija, en receta mental».

Una vez más, hemos acechados por la trampa de los dogmatismos: el enfoque sistémico conduciendo a un sistemismo intransigente, o a un biologismo reduccionista. Hemos amenazados por la seducción ejercida por modelos concebidos en tanto que culminaciones de la reflexión y no como puntos de partida de la búsqueda. Hemos tentados por la transposición demasiado simplista de

modelos o de leyes biológicas a la sociedad^{*}. La cibernética de las regulaciones al nivel molecular ofrece modelos generales, de los que ciertos aspectos son transferibles, con las reservas y restricciones lógicas, al nivel de los sistemas sociales. Pero la mayor endeblez de esos modelos es que, obviamente, no pueden asumir las relaciones de fuerza y los conflictos que intervienen entre los elementos de todo sistema socioeconómico. Es lo que hacía notar el economista J. ATTALI en una reunión del Grupo de los Diez, consagrada al mantenimiento de los equilibrios biológicos y sociales: «A diferencia del sociólogo, el biólogo observa sistemas cuyas leyes están bien establecidas: no se modifican mientras se los estudia. En cuanto a las moléculas, a las células o a los microbios, ¡no vendrán nunca a quejarse de su condición! ».

Uno de los más graves peligros que amenaza al enfoque sistémico es la tentación de la «teoría unitaria», del modelo global-respuesta-a-todo, capaz de preverlo todo. El empleo del lenguaje matemático -generalizador por su propia esencia- puede llevar a un formalismo que aisle al enfoque sistémico, en lugar de abrirlo a la práctica. La teoría de los sistemas generales difícilmente elude este peligro: unas veces se encierra en el lenguaje de la teoría de grafos, de la teoría de conjuntos, de la teoría de juegos, de la teoría de la información; otras, no constituye sino un conjunto de aproximaciones descriptivas, a menudo muy esclarecedoras, mas sin aplicaciones concretas.

El enfoque sistémico operativo es una de las vías hacia la superación de estas alternativas. Evita los peligrosos escollos del reduccionismo paralizador y del sistemismo globalizador. Desemboca en la transmisión del conocimiento, la acción y la creación.

En la transmisión de conocimiento, porque el enfoque sistémico ofrece un marco de referencia conceptual que ayuda a organizar los conocimientos a la medida de su adquisición, refuerza su memorización y facilita su transmisión.

En la acción, porque el enfoque sistémico permite segregar reglas para afrontar la complejidad. Porque permite situar y jerarquizar los elementos sobre los que se fundan las decisiones.

Por último, en la creación, porque el enfoque sistémico cataliza la imaginación, la creatividad, la invención. Es el soporte del pensamiento cognoscitivo. Tolerante y pragmático, el pensamiento sistémico se abre a la analogía, a la

* El peligro de las transposiciones demasiado directas de lo biológico a lo social había sido perfectamente detectado por FRIEDRICH ENGELS cuando le escribía, en 1875, a PIOTR LAVROV, sociólogo y publicista ruso: «La diferencia esencial entre la sociedad humana y la sociedad animal estriba en que los animales como máximo colectan mientras que los hombres producen. Esta diferencia, única pero capital, prohíbe por si misma transponer pura y simplemente las leyes de las sociedades animales a las de los hombres.» Los trabajos de A.J. LOTKA, en 1925, acerca de la dinámica de las poblaciones y de V. VOLTERRA, en 1931, sobre la teoría matemática de la lucha por la vida, han demostrado después que no había que ser tan severos como Engels en punto al interés de las transferencias de lo biológico a lo social.

metáfora, al modelo. Antaño excluidos del método científico, helos ahora rehabilitados. Para el enfoque sistémico todo lo que rompe tabiques entre los conocimientos y desbloquea la imaginación es bien venido: se muestra abierto, a semejanza de los sistemas objetos de su estudio.

La tierra abriga el embrión de un cuerpo y el esbozo de un espíritu. Este cuerpo se mantiene con vida gracias a las grandes funciones ecológicas y económicas reunidas en lo que es la ecosfera. La conciencia colectiva emerge de la comunicación simultánea de los cerebros de los seres humanos. Constituye la noosfera.

Ecosfera y noosfera tienen, pues, por soporte energía e información. La acción es la síntesis de una energía y de una información. Más toda acción exige una duración: el nexo de unión entre energía, información y acción es el tiempo.