

CURSO: FUNDAMENTOS Y FUNCION DE LA INGENIERIA

TEMA: SISTEMAS

AUTOR: F. SAEZ VACAS

E.T.S.I.T.M. 1.976-77

FFI/SIS. 76.01

INDICE

0. OBJETIVOS DEL CURSO
1. DEFINICIONES DE 'SISTEMA'
2. SISTEMAS NATURALES
  - 2.1. Sistema solar
  - 2.2. Una sola Tierra
  - 2.3. El hombre, ese desconocido
3. SISTEMAS ARTIFICIALES
  - 3.1. Tecnosfera y Biosfera
  - 3.2. Problemas derivados de la tecnología
    - 3.2.1. El automóvil
    - 3.2.2. El DDT y los plaguicidas
    - 3.2.3. La energía nuclear
    - 3.2.4. La yatrogénesis
  - 3.3. El ingeniero y la tecnosfera
4. MAS SOBRE EL CONCEPTO DE SISTEMA
5. CIBERNETICA Y TEORIA DE SISTEMAS, DISCIPLINAS MULTIDISCIPLINARIAS.  
BREVE APUNTE HISTORICO.
6. CLASES, CARACTERISTICAS Y COMPOSICION DE LOS SISTEMAS
  - 6.1. Sistemas cerrados y abiertos
  - 6.2. Rasgos estructurales y funcionales de los sistemas
    - 6.2.1. Estructura
    - 6.2.2. Función
    - 6.2.3. Dinámica de sistemas
  - 6.3. Estado de un sistema. Comportamiento

- 6.4. Variedad y complejidad. Ley de la variedad requerida.
7. APROXIMACION FORMAL A UNA TEORIA GENERAL DE LOS SISTEMAS
  - 7.1. Clasificación de los sistemas, según Klir
  - 7.2. Estructura de transición entre estados.
  - 7.3. Formulaciones de un sistema
8. JERARQUIA DE LOS SISTEMAS
9. LA ERA DE LOS SISTEMAS Y EL PENSAMIENTO EXPANSIONISTA.
10. TECNOLOGIA DE Y PARA LA ERA DE LOS SISTEMAS.
11. UNA APLICACION DEL ENFOQUE Y LA TECNOLOGIA SISTEMICAS: MODELO COMPUTADO DEL MUNDO PARA UNA HUMANIDAD EN LA ENCRUCIJADA.
12. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

## 0. OBJETIVOS DEL CURSO

Dar a conocer los conceptos de

- a) Sistema y conceptos relacionados.
- b) Enfoque sistémico. Su necesidad en un mundo crecientemente tecnológico.

## 1. DEFINICIONES DE 'SISTEMA'

La palabra 'Sistema' se utiliza de manera tan generalizada - que, en cierta medida, ha llegado a vaciarse de significado:

Ejs.: Sistema social.  
 Sistema político.  
 Sistema métrico decimal.  
 Sistema celular.  
 Sistema nervioso central.  
 Sistema planetario.  
 Sistema solar.  
 Por sistema.  
 Sistemático  
 Servosistemas.  
 Sistema educativo.  
 Sistema de telecomunicación.  
 Sistema filosófico.  
 Sistema Linneano.  
 Sistema de numeración.  
 Ecosistema.  
 Sistema operativo.  
 Sistema electoral.  
 Sistema de información.  
 Sistema de decisión.

...

Algunas definiciones:

- 1.1. Conjunto de reglas o principios enlazados entre sí

(Real Academia Española de la Lengua).

- 1.2. Conjunto de cosas que, ordenadamente relacionadas entre sí, contribuyen a determinado objeto (R.A.E.L.).
- 1.3. En Biología: conjunto de órganos que intervienen en alguna de las principales funciones vegetativas (R.A.E.L.).
- 1.4. Agregación o ensamblaje de objetos unidos por alguna forma de interacción o interdependencia regular; un grupo de unidades diversas combinadas por la naturaleza o artificialmente para formar un todo integral, y para funcionar, operar o moverse al unísono y, a menudo, obedientes a algún tipo de control; un todo orgánico u organizado. (N. Jordan).
- 1.5. Conjunto de elementos en interacción dinámica, organizados en función de un objetivo. (De Rosnay)
- 1.6. Colección de objetos, llamadas partes, que están correlacionadas de alguna manera (Langefors).

Jordan ha demostrado que todas las definiciones coinciden en un significado central. Significa esto que el nombre 'sistema' contiene un núcleo constante muy general que admite mucha variación en los detalles, lo que no lo hace confuso o ambiguo. La definición n° 6 es muy general; hay que comprender que la palabra 'objetos' puede ser efectivamente objeto, pero también cosa, regla, elemento, concepto, etc.... Por ejemplo, en un sistema de numeración se tratará de conceptos, en un sistema telefónico o humano se tratará de objetos u órganos, en un sistema social de personas.

## 2. Sistemas naturales

La Naturaleza nos ofrece ejemplos incontables de sistemas complejos. Entendemos por sistema complejo aquel en que la correlación (interrelación, interacción) entre las partes es importante.

Básicamente es esta clase muy general de sistemas la que interesa aquí, al menos para plantear el tema.

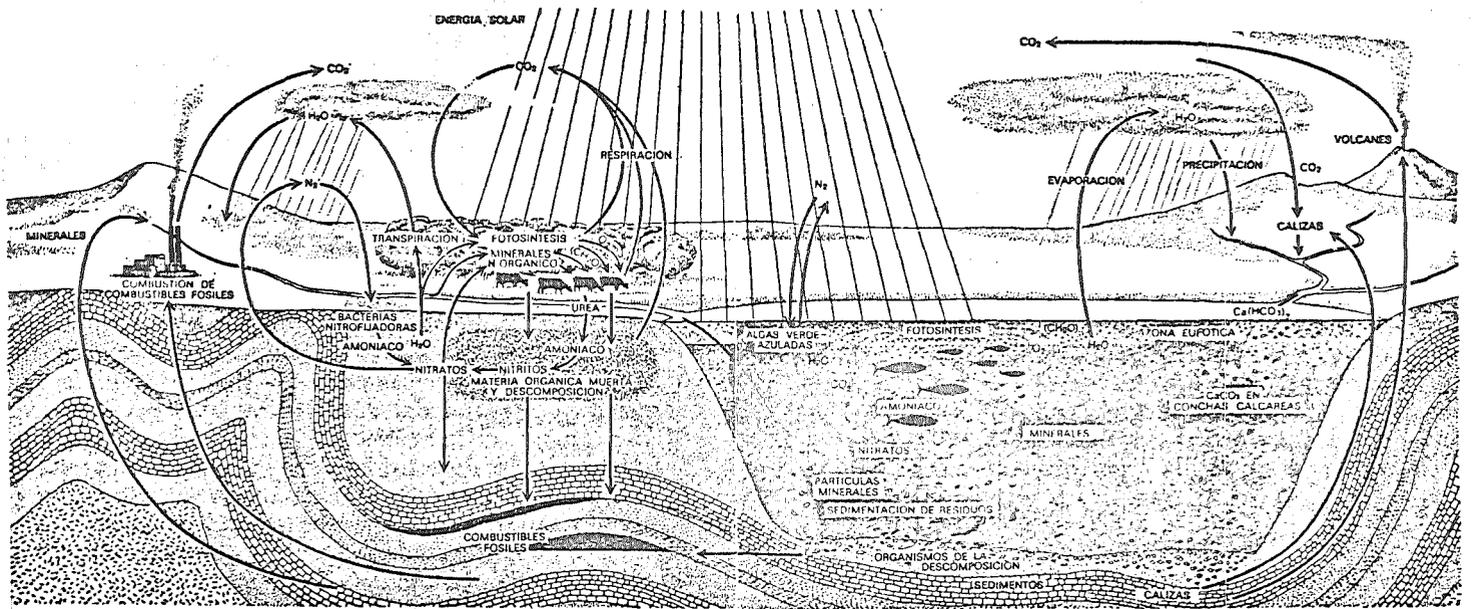
### 2.1. Sistema solar

Este es parte de una galaxia que pertenece al conjunto de las galaxias que constituyen el universo, sistema mal conocido aún en sus grandes líneas.

### 2.2. Una sola Tierra

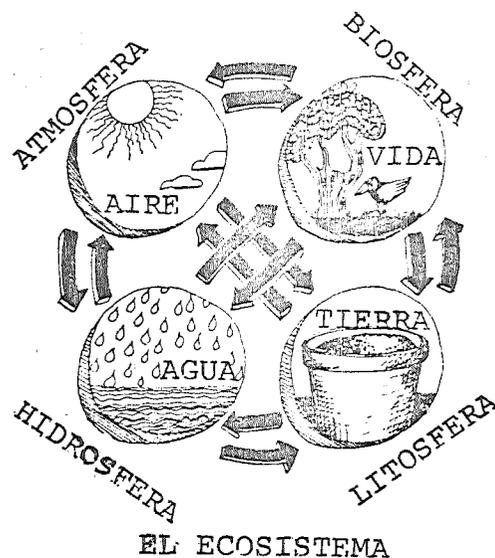
La tierra es un planeta del sistema solar. Es, a su vez, un sistema, que empieza a ser considerado como tal desde hace muy pocos años. Constituye una unidad pero de tal manera compleja que, para ser estudiada, necesita ser fraccionada: atmósfera, hidrosfera, litosfera y biosfera. Cualquiera de estas partes necesita ser subdividida por el mismo motivo. Así, por ejemplo, en la biosfera -esa delgada capa terrestre de materia viva- se analizan por separado distintos ciclos, de los que los principales se ilustran en la próxima figura (Scientific American). Pueden considerarse los ciclos de la energía, del agua, del carbono, del oxígeno, del nitrógeno, etc.... Cualquiera de estos ciclos es extraordinariamente complejo. Pensemos que una sola de las etapas del ciclo energético, la fotosíntesis, increíble proceso químico que transforma, por intermedio de ciertas bacterias y algas, del fitoplancton y de las plantas verdes superiores, la energía solar en materia orgánica, no ha podido aún ser reproducida por nuestra tecnología.

Pues bien, no hay que olvidar que todo fraccionamiento es lícito en la medida en que se conserva conciencia de las interrelaciones de la parte aislada con todo lo que es exterior a ella. En términos muy simples, se quiere significar que cualquier cambio en cualquier elemento de la parte aislada repercute en todo su exterior (entorno) y cualquier cambio en cualquier elemento del entorno influye en la parte aislada. Dicho de otro modo, el aislamiento de una parte no deja de ser -aún cuando la parte fuera un elemento



FUENTE: LA BIOSFERA

físico- un artificio analítico con el que hacer frente al estudio de lo complejo: la fotosíntesis se observa en la secuencia del ciclo de energía, éste se relaciona con todos los demás y éstos entre sí, todos se integran en la biosfera, la biosfera no es independiente de la hidrosfera, atmósfera y litosfera, ni éstas entre sí, todas constituyen lo que llamamos planeta Tierra, éste es un elemento del sistema solar y recibe toda su energía de él, que comparte en delicado equilibrio con el resto de elementos del sistema solar, el sistema solar se integra en una galaxia en interacción con otros sistemas solares, la galaxia interactúa con otras galaxias, etc....



FUENTE: LE MACROSCOPE

Intuitivamente se comprende que el hecho de talar un bosque, lo que modifica la capacidad de fotosíntesis de la Tierra, afectará menos al sistema solar que cualquier mínimo cambio en la transferencia de energía del sol hacia la Tierra. La repercusión será mayor - dentro del propio sistema Tierra y, en particular, en aquellos elementos con los que la interrelación del sistema bosque (en donde no sólo se verifican operaciones energéticas) sea mayor. En definitiva en alguna zona del ecosistema.

La vida en la Tierra se mantiene gracias a una organización modélica. Toda su energía la recibe del Sol que, cada segundo, lanza unas cuatro toneladas en forma de energía correspondientes a la pérdida producida en la transformación de 657 millones de toneladas de hidrógeno en 653 millones de toneladas de helio. De esa energía, distribuida a todo el sistema solar, la Tierra recibe una dosmilmillonésima parte, de la que se usa menos del uno por ciento. Miles - de millones de años se han requerido para formarse, por procedimientos desconocidos, los delicados y complejos mecanismos que han filtrado y reducido la radiación solar en la Tierra a límites aceptables para la constitución y mantenimiento de organismos vivos (B. Ward y R. Dubos).



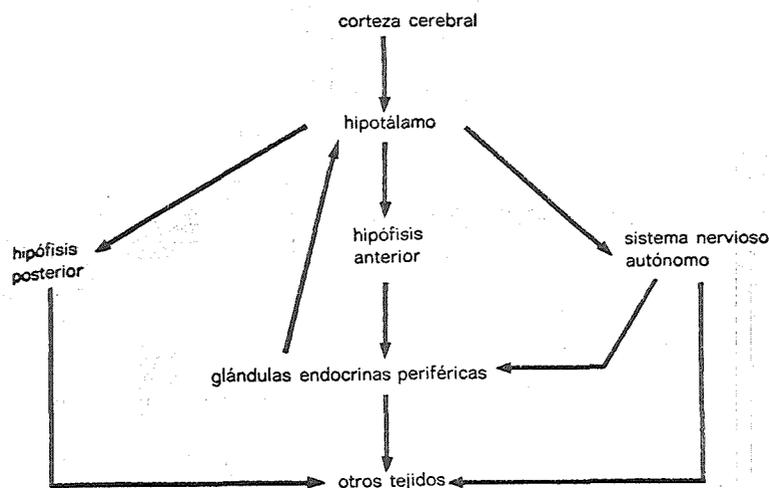


de su medio interior a pesar de las perturbaciones en el sistema. Como es lógico, estos mecanismos no son bien conocidos, igual que - otras muchas cosas, y los ecólogos se preguntan entre qué límites actúan estos mecanismos.

### 2.3. El hombre, ese desconocido

Con mayores o menores niveles de complejidad, encontramos soluciones parecidas (ciclos, interrelaciones, regulación, entorno y medio interior) en la mayoría de los elementos que pueblan el - planeta Tierra. Los organismos vivos son sistemas y de esta forma deberían ser estudiados. Pero ocurre que son extremadamente complejos, aún cuando pertenezcan a los peldaños inferiores de la escala de seres vivos. Esta es la causa de que sean estudiados por partes. La Ciencia aísla algunos de sus aspectos, creando diferentes ramas científicas.

Tomemos al hombre, por ejemplo. Este se estudia a sí mismo dividiéndose en partes, incapaz de abarcar tanta variedad y sobre todo la inmensa unidad de esa variedad. Sólo recientemente ha comenzado a ser considerado -aún con las grandes dificultades inherentes al empeño- el estudio de las más importantes interrelaciones - de los distintos sistemas en que tradicionalmente se divide el organismo físico humano.

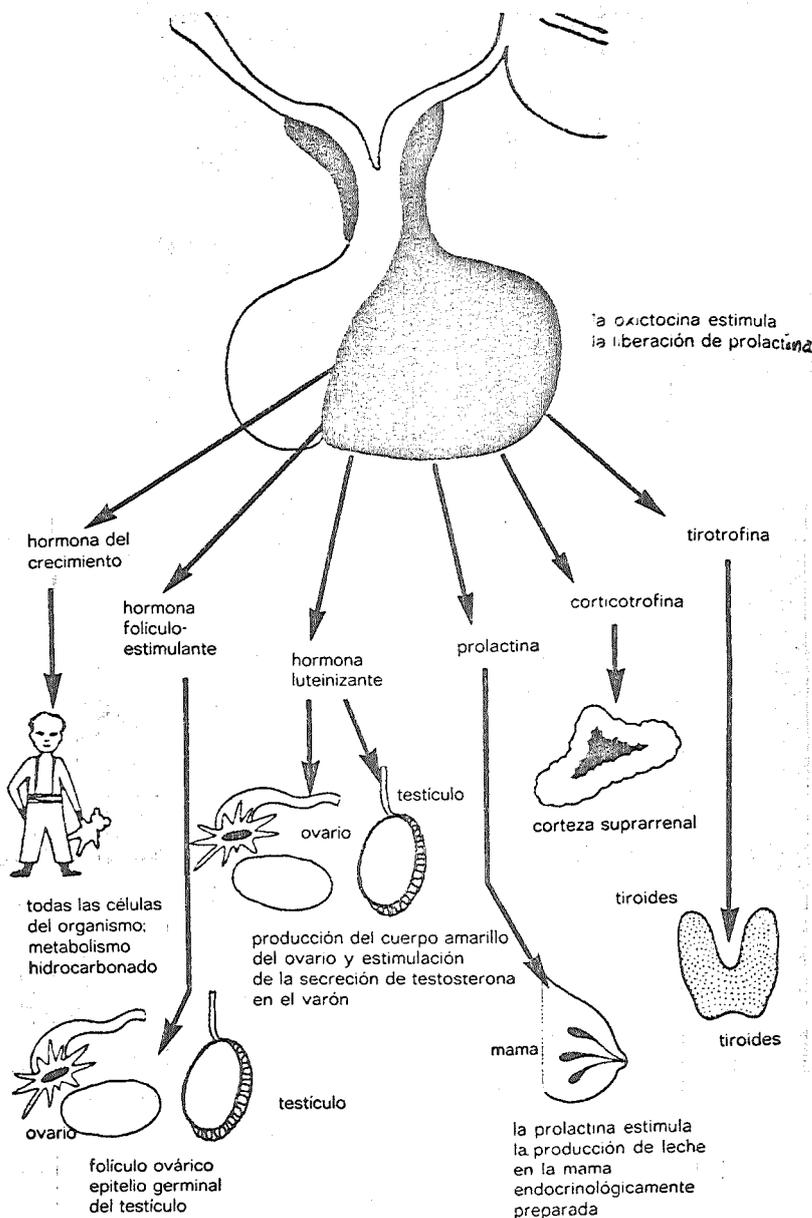


CONTROL CEREBRAL DEL SISTEMA ENDOCRINO

FUENTE: LAS HORMONAS DEL ORGANISMO HUMANO

En lo que afecta a los objetivos de este curso nos basta con recoger algunos esquemas que refuercen la definición de sistema y la necesidad de pensar en términos sistémicos.

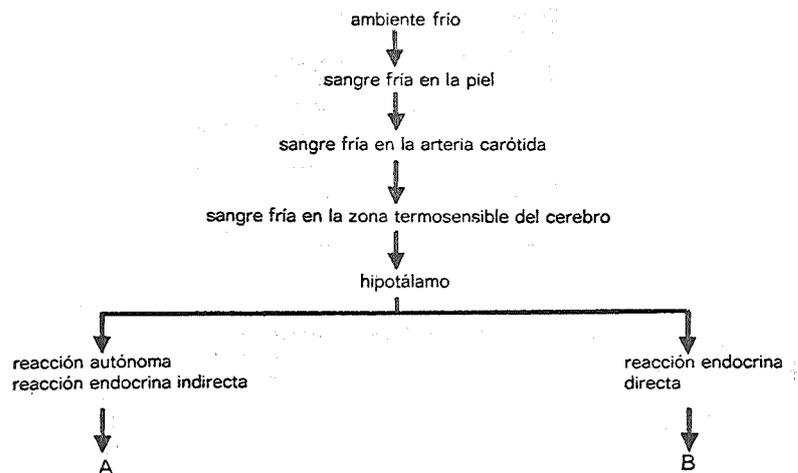
Hoy es imposible estudiar el sistema endocrino sin estudiar sus conexiones con el sistema nervioso. En la figura anterior se representan de manera muy simplificada los ciclos hormonales. Tal representación integra los que, en otro tiempo, eran tratados como sistemas separados. El hipotálamo, formación del tamaño aproximado de una nuez situada en la base del cerebro, actúa como principal centro de regulación de una increíble cantidad de actividades y lo hace básicamente a través de la hipófisis tanto por vía neuronal como por vía humoral. También está asociado al sistema nervioso autónomo.



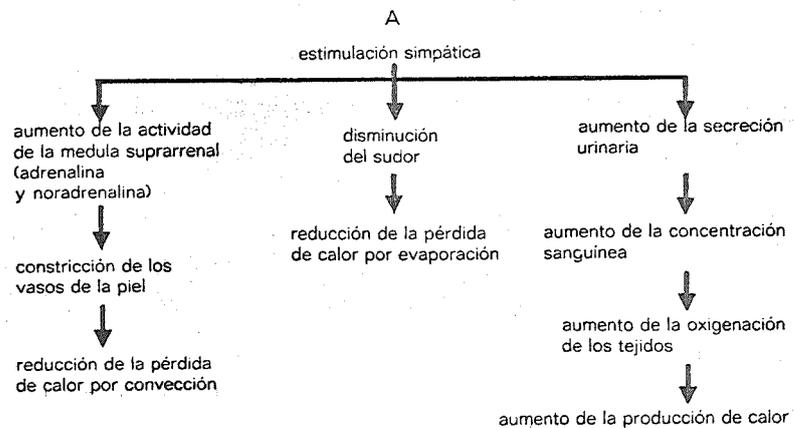
ACCIONES DEL LOBULO ANTERIOR DE LA HIPOFISIS.

El hipotálamo tiene relación, entre otras funciones, con la respuesta del organismo al calor y al frío, con el metabolismo del agua, los electrolitos, los azúcares y las grasas. Regula el apetito, el crecimiento, las funciones sexuales, la actividad del corazón y de los vasos sanguíneos, la respiración, la digestión y el sueño y todas las funciones corporales que escapan al control de la voluntad. Gran parte de las funciones mencionadas son llevadas a cabo por medio de mensajes que, a través de la hipófisis, llegan a las glándulas de secreción interna. (R. Greene).

Por medio de estos y de otros mecanismos mantiene además el organismo el equilibrio general de su medio interior, con independencia de los cambios que en algunas de sus partes puedan producirse y de los cambios de su medio exterior. Este principio lo descubrió el médico francés Claude Bernard hace aproximadamente un siglo y en 1.932, un fisiólogo norteamericano, W. Cannon, definió el



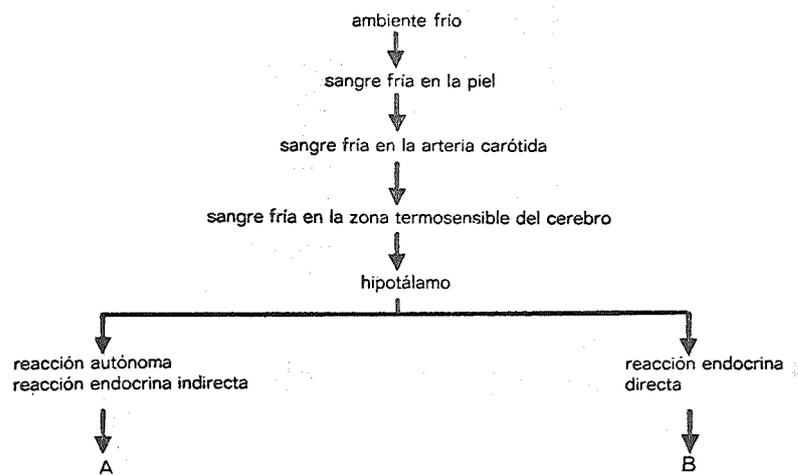
**REACCION AL FRIO: SISTEMA ENDOCRINO Y SISTEMA NERVIOSO AUTONOMO.**



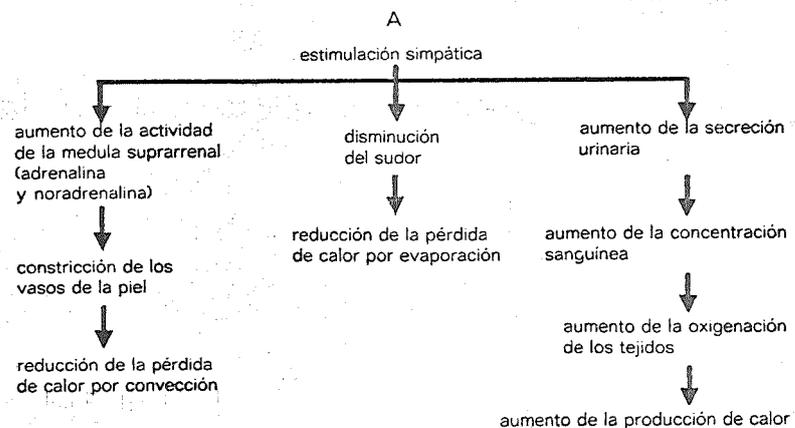
FUENTE: LAS HORMONAS DEL ORGANISMO HUMANO.

El hipotálamo tiene relación, entre otras funciones, con la respuesta del organismo al calor y al frío, con el metabolismo del agua, los electrolitos, los azúcares y las grasas. Regula el apetito, el crecimiento, las funciones sexuales, la actividad del corazón y de los vasos sanguíneos, la respiración, la digestión y el sueño y todas las funciones corporales que escapan al control de la voluntad. Gran parte de las funciones mencionadas son llevadas a cabo por medio de mensajes que, a través de la hipófisis, llegan a las glándulas de secreción interna. (R. Greene).

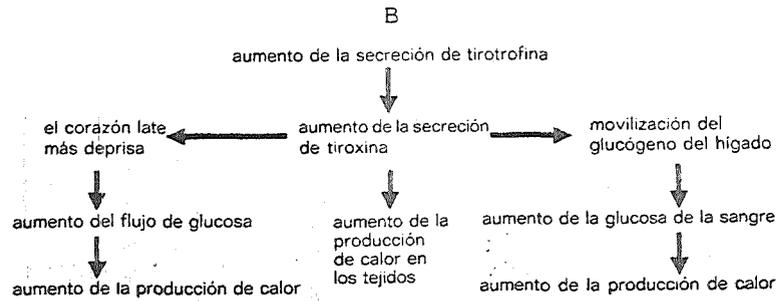
Por medio de estos y de otros mecanismos mantiene además el organismo el equilibrio general de su medio interior, con independencia de los cambios que en algunas de sus partes puedan producirse y de los cambios de su medio exterior. Este principio lo descubrió el médico francés Claude Bernard hace aproximadamente un siglo y en 1.932, un fisiólogo norteamericano, W. Cannon, definió el



### REACCIÓN AL FRÍO: SISTEMA ENDOCRINO Y SISTEMA NERVIOSO AUTÓNOMO.



FUENTE: LAS HORMONAS DEL ORGANISMO HUMANO.



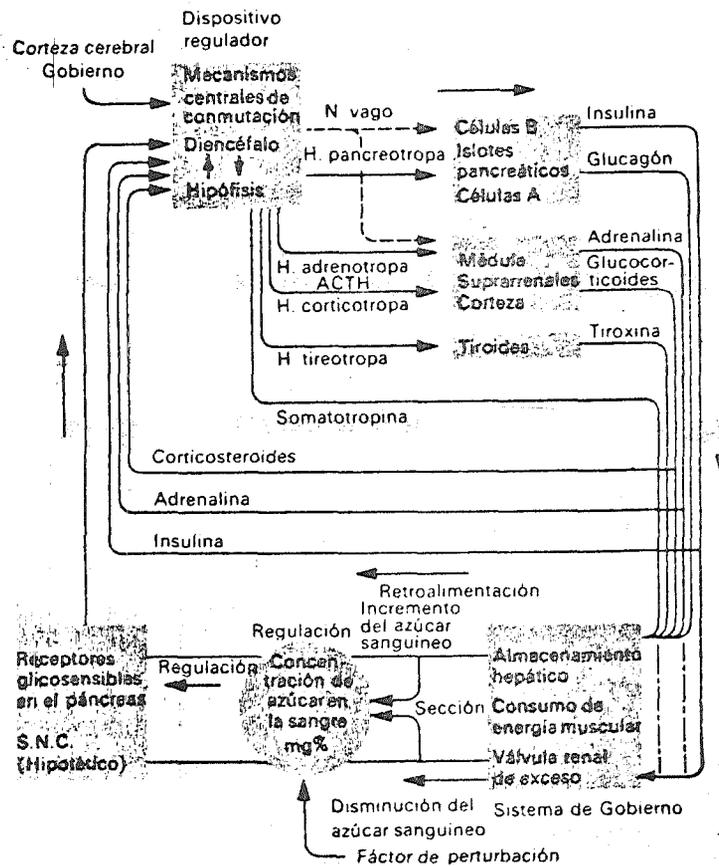
FUENTE: LAS HORMONAS DEL ORGANISMO HUMANO

concepto de homeostasis como función y conjunto de los mecanismos que aseguran el control de los equilibrios fisiológicos. Estos equilibrios son dinámicos.

En la figura anterior se traza la cadena de acciones que tienen lugar en el organismo humano frente a una disminución de la temperatura ambiente, supuesto que se trate de un organismo sano. Aunque no aparece explícitamente en el esquema, es evidente que las acciones descritas se desarrollan hasta conseguir un determinado nivel calórico, lo que indica la existencia de elementos sensores junto con un funcionamiento circular o basado en la retroacción (también, realimentación). Como veremos más adelante, estos dos últimos conceptos, y las consecuencias que de ellos se derivan, son centrales en una clase de sistemas, llamados sistemas de regulación o control, de los que la homeostasis es un ejemplo insigne. La siguiente figura explicita ya gráficamente los bucles de retroacción en el caso de la regulación homeostática de la tasa de azúcar en la sangre. (Von Bertalanffy)

### 3. Sistemas artificiales

El hombre ha estudiado la Naturaleza y por medio de la ciencia y de la técnica ha buscado independizarse de ella y luego dominarla. Ha traducido sus observaciones en leyes y principios, primero, y después en técnicas. Las técnicas se han transformado en tecnología y el resultado general ha sido un gran progreso en sus condiciones de vida. El hombre no depende ya inmediatamente de la Natu



REGULACION HOMEOSTATICA DE LA TASA DE AZUCAR EN LA SANGRE.

FUENTE: TEORIA GENERAL DE LOS SISTEMAS

raleza para su sustento y su abrigo y se ha ampliado enormemente a sí mismo: domina la energía para fabricar, para mover los objetos y desplazarse a cualquier parte y puede ver, oír, sentir y hacerse oír a largas distancias. Ha llenado la Tierra de objetos artificiales (casas, coches, autopistas, teléfonos, industrias, presas, antenas, calefacción, etc..., "artefactos" según H. Simon (pronúnciese Sáimon).

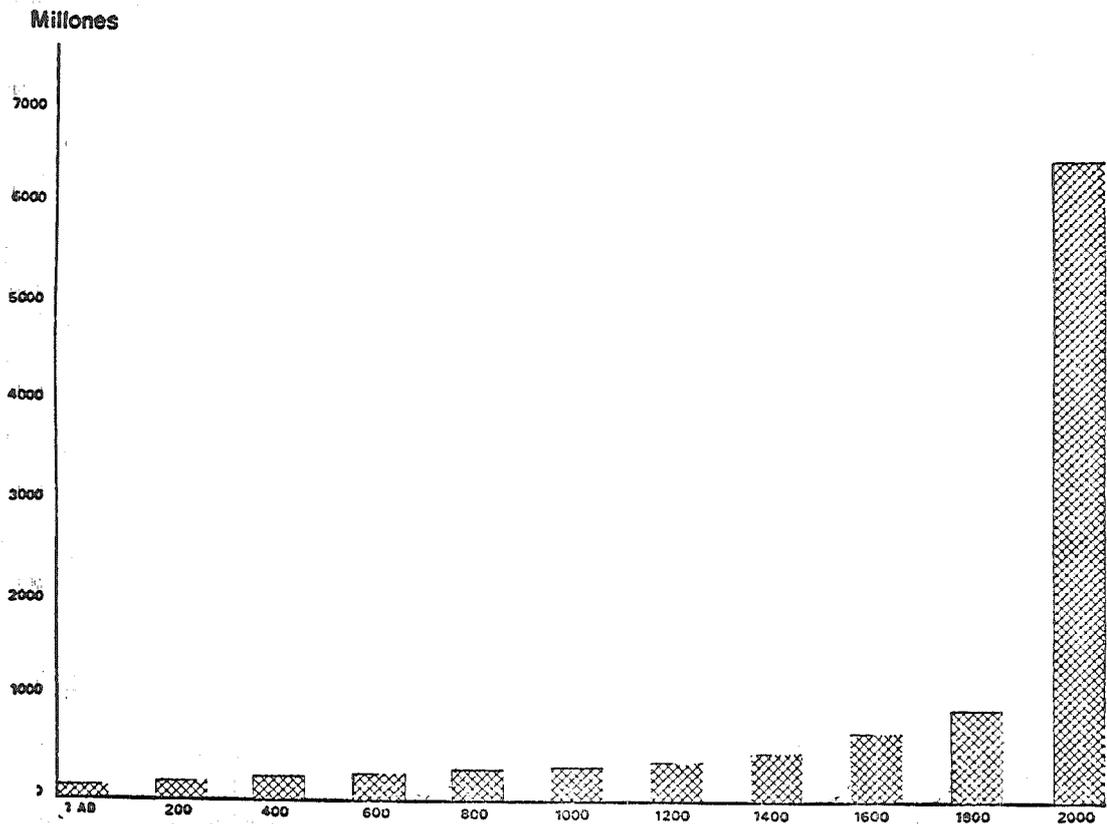
3.1. Tecnosfera y Biosfera

Estamos ahora en la fase del hombre tecnológico, esto en los países desarrollados. En ellos el hombre se ha rodeado de artefactos, ha creado lo que algunos llaman la Tecnosfera. La ingeniería, en su sentido más general, se ha aplicado a la creación, uso

y mantenimiento de artefactos. Estos artefactos hacen la vida del individuo humano más cómoda, más larga, más potente, pero tiene sus contraefectos. En resumen, puede decirse que la tecnosfera ha llegado a tener tal entidad que ha empezado a perturbar a la biosfera.

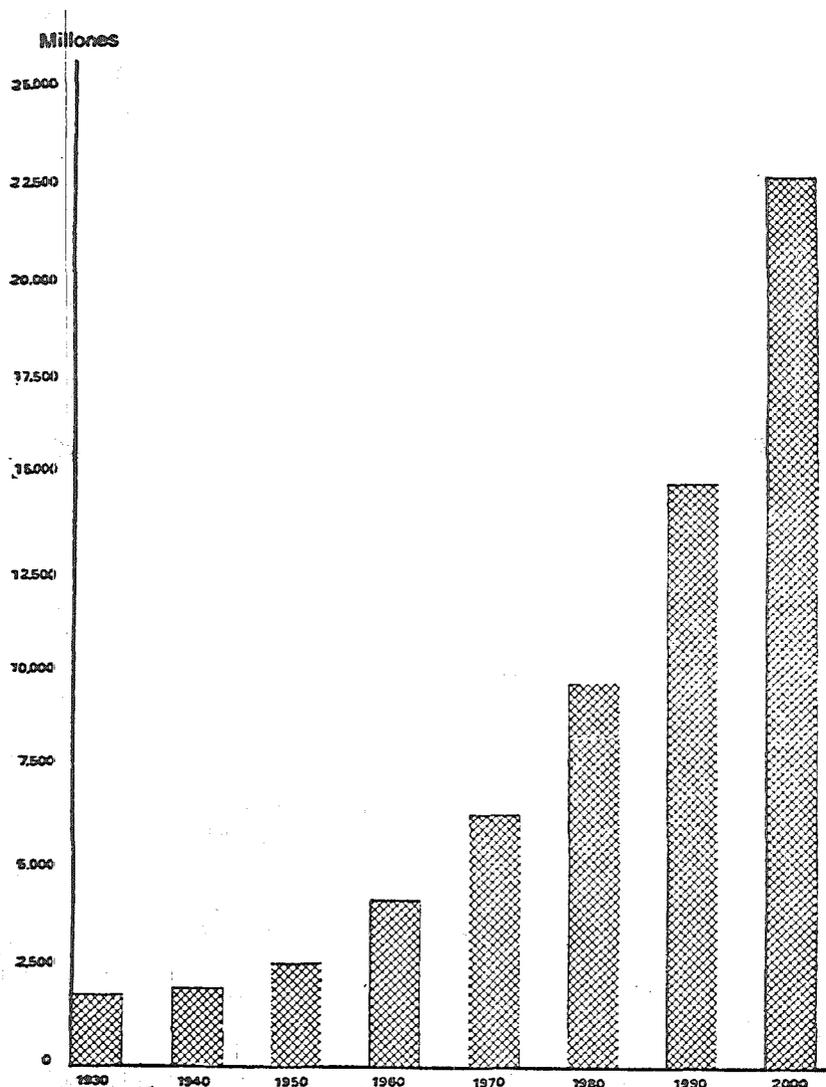
Muy sucintamente, los mayores problemas que hoy tiene planteados la humanidad son:

- El crecimiento demográfico
- El crecimiento del consumo de energía
- El crecimiento relativo de la población urbana
- La contaminación
- La injusta distribución de las riquezas.



Población Mundial. Año 1 d. c. al año 2000 d. c.

FUENTE: UNA SOLA TIERRA

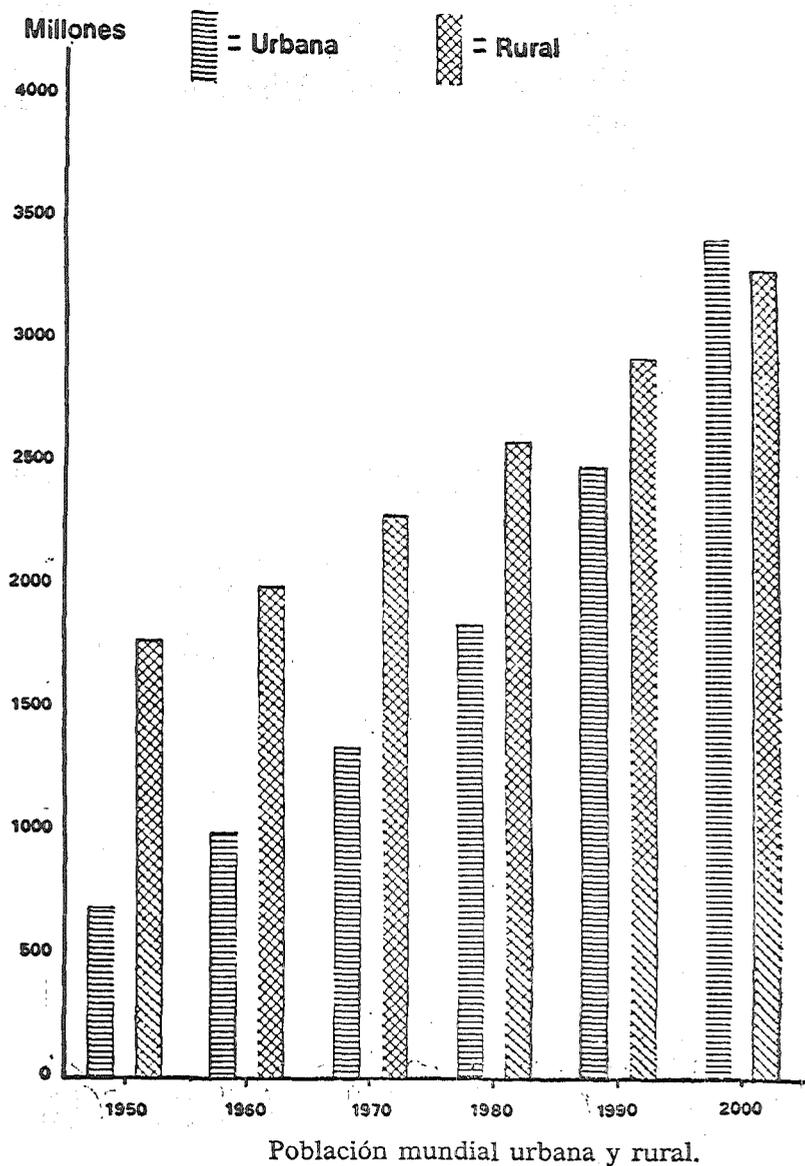


Consumo mundial de energía. 1930-2000 d. c.  
Equivalente en millones de toneladas métricas de carbón.

FUENTE: UNA SOLA TIERRA

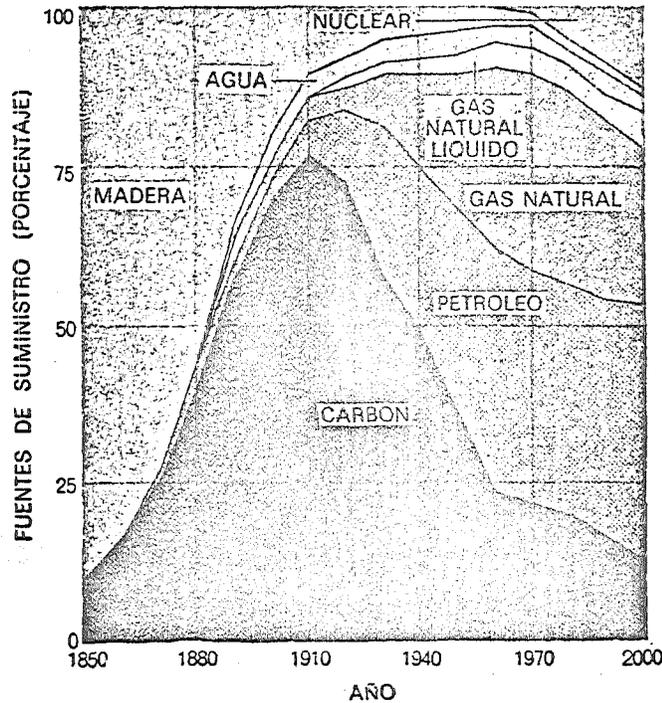
Estos problemas tienen por causa directa los procesos de desarrollo a que el hombre se ha entregado, los sistemas económicos y políticos en que ha basado ese desarrollo y su falta de conocimiento correcto y completo de los sistemas naturales.

Desgraciadamente, en no pocas ocasiones los desarrollos basados en la tecnología humana han ido en contra y no a favor de los ciclos de la naturaleza y del organismo humano. Por ejemplo, su in-



FUENTE: UNA SOLA TIERRA

saciable necesidad de energía está a punto de agotar en pocos años los yacimientos de carbón y petróleo que los ciclos naturales han ido creando a lo largo de millones de años. ¿Poseerá la Tierra los mecanismos necesarios para acelerar estos ciclos?. La siguiente figura nos ofrece una estimación de la distribución relativa de fuentes energéticas hasta el año 2.000.



FUENTE: LA BIOSFERA

### 3.2. Problemas derivados de la tecnología

La historia reciente de la tecnología nos dice que la acumulación de artefactos y el uso indiscriminado de la técnica, aparte de producir mucho bien al hombre, desde un cierto nivel de desarrollo (que muchos países aún no han alcanzado) produce no pocos efectos negativos. A continuación se citan algunos ejemplos que pueden comentarse más extensamente en clase.

#### 3.2.1. El automóvil

El automóvil hay que verlo hoy en el contexto de las concentraciones urbanas, de la insuficiencia de infraestructura vial y de la escasez de energía.

#### 3.2.2. El D.D.T. y los plaguicidas

Es ya un ejemplo clásico de la categoría de contaminantes -

plaguicidas. Otros contaminantes son los de la atmósfera y de las aguas.

En los años 50 no se podía sospechar que el DDT podía propagarse a lo largo de la cadena alimentaria produciendo efectos desastrosos.

Otros plaguicidas destruyen algún eslabón de la misma cadena, rompiendo el equilibrio y provocando a lo mejor la explosión de otro punto de la misma. Hoy está admitido que no es posible utilizar un plaguicida sin un estudio muy cuidadoso del mismo y de los efectos de su inserción en unas determinadas condiciones atmosféricas, climáticas, de suelo y de ecologías vegetales. Este último punto de vista cae de lleno dentro de lo que llamaremos enfoque sistémico.

### 3.2.3. La energía nuclear

La técnica ha sido capaz de romper el átomo y por los procesos de fisión y de fusión ha utilizado la energía nuclear para la guerra y para la paz. La fusión nuclear intenta imitar a la que ocurre en el mismo corazón del sol y de otras estrellas. No se conoce bien el proceso y se está aplicando, y sobre todo se piensa aplicar, a ayudar a resolver el problema de escasez de energéticos. El uranio existe en cantidades limitadas en la Naturaleza pero ¿qué pasará con sus desechos?. El aprovechamiento de la energía nuclear ¿será un caso análogo al del D.D.T.?

### 3.2.4. La yatrogénesis

Es éste un fenómeno importante. Los avances de la medicina y, especialmente, de las condiciones generales de higiene y salubridad en que se desenvuelve una parte de la humanidad han alargado su vida y hecho retroceder a muchas enfermedades. Sin embargo, han aparecido varias, algunas nuevas, físicas unas, mentales otras. Una buena porción se atribuyen ya a errores médicos y a efectos de

los medicamentos. Esto es la yatrogénesis, es decir, la generación de enfermedades por los médicos y los medicamentos (I, Illich). Detrás de estas causas inmediatas hay que ver un conocimiento insuficiente del hombre como unidad compleja y también la ceguera de los sistemas económicos actuales. El caso parece análogo al de la perturbación de los ciclos naturales de la Tierra, centrados aquí en el organismo humano.

### 3.3. El ingeniero y la tecnosfera

Al ingeniero, como creador, utilizador o mantenedor de artefactos en esta tecnosfera que se ha descrito muy someramente y que todos imaginamos le interesa -pueda o no pueda influir directamente en los acontecimientos- conocer el concepto de sistema y los métodos sistémicos. Le interesa saber que muchos de los sistemas artificiales puestos en pie han producido o producen degradación del entorno (eufemísticamente llamada deseconomía) -como es la contaminación-, inadaptación de unos sistemas con otros, peligro -como puede ser el caso de la energía nuclear, falta de equidad en el consumo, falta de fiabilidad, etc.... En mi opinión personal debe aprender a razonar en esta forma crítica, por encima de su problema concreto, por encima de la técnica pura, y ejercer ese deber, que se apoya en un derecho ciudadano y humano, partiendo de su preparación científica y tecnológica. Vistas así las cosas, el planteamiento que se ofrece al ingeniero parece tener al menos una doble vertiente, ética por un lado y metodológica, por otro, ésta última en el sentido que analizaremos posteriormente, de razonamiento expansionista y no reduccionista. De tal tipo de razonamiento se desprenden ventajas - que pueden potenciar el aprendizaje y el trabajo profesional, sin - que necesariamente se incurra siempre en problemas de índole ética.

### 4. Más sobre el concepto de sistema

Cualquiera de las definiciones dadas en el apartado 1, por

corta y sencilla que sea, contiene una gran riqueza, es aplicable a enorme variedad de sistemas naturales y artificiales y sugiere numerosas consecuencias. Los elementos del conjunto llamado sistema y el propio conjunto poseen las tres siguientes propiedades generales (Ackoff):

- 4.1. Las propiedades o comportamiento de cada elemento tienen un efecto sobre las propiedades o comportamiento del conjunto considerado como un todo. Por ejemplo, cualquier órgano de un cuerpo animal afecta a su funcionamiento total.
- 4.2. Las propiedades y comportamiento de cada elemento, y la manera cómo aquellas afectan al total, dependen de las propiedades y comportamiento de al menos otro elemento del conjunto. Por consiguiente, ninguna parte tiene un efecto independiente sobre el total y cada una viene afectada al menos por otra parte. Ejemplo: el comportamiento del corazón y su efecto sobre el cuerpo depende del comportamiento de los pulmones.
- 4.3. Todo posible subgrupo de elementos tiene las dos primeras propiedades: cada uno tiene un efecto no independiente sobre el total. Entonces, el total no puede ser descompuesto en subconjuntos independientes. Un sistema no puede ser subdividido en subsistemas independientes. Ejemplo: todos los subsistemas del cuerpo animal, como los subsistemas nervioso, respiratorio, digestivo y motor, interactúan y cada uno afecta al funcionamiento del total.

Las tres propiedades que se acaban de enunciar parecen muy simples. Son, en realidad, muy profundas y en la práctica se olvidan continuamente -a nivel de análisis- y se transgreden a nivel de diseño. Las consecuencias dependerán de la importancia del sistema.

Un sistema, en virtud de lo dicho, exhibe características o comportamientos que ninguna de sus partes puede dar. Se dice que un sistema es más que la suma de sus partes. Un ser humano puede escri

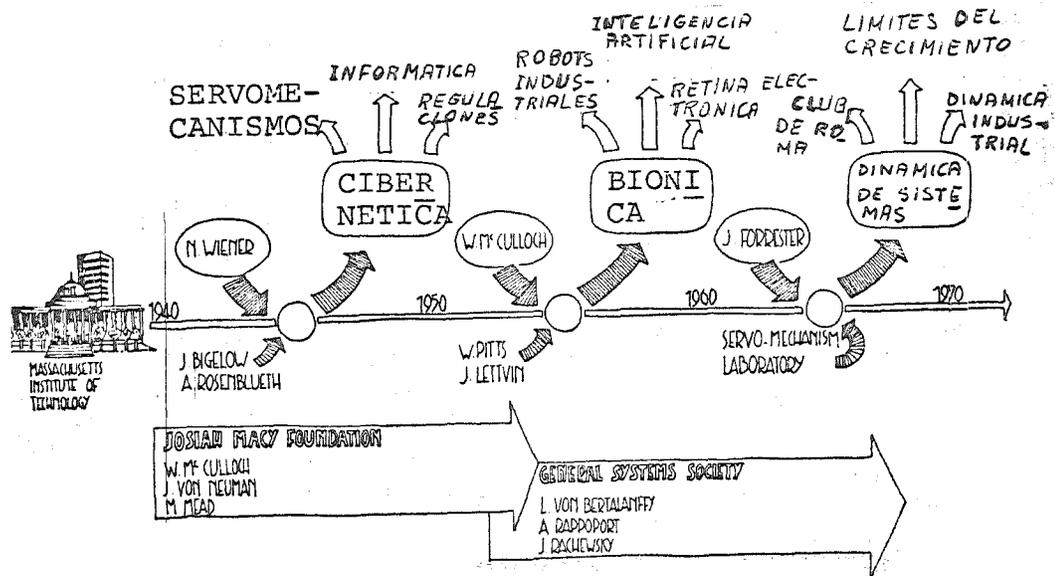
bir o correr, lo que no puede ninguna de sus partes. El pertenecer al sistema aumenta o disminuye las capacidades de cada elemento, en ningún caso deja de afectarle. Un individuo que pertenece a una nación u organismo se ve impedido de hacer ciertas cosas que, en circunstancias distintas, podría llevar a cabo, y capacitado para - - otras que no podría hacer si no perteneciera.

Visto estructuralmente, un sistema es un todo divisible; pero visto funcionalmente constituye un todo indivisible, en el sentido de que se pierde alguna de sus propiedades esenciales cuando se toman las partes. Las partes de un sistema pueden ser sistemas - también y cada sistema puede ser, a su vez, parte de un sistema mayor. Por ejemplo, un estado contiene ciudades y es parte de una nación; todos son sistemas.

## 5. Cibernética y Teoría de Sistemas, disciplinas multidisciplinarias: Breve apunte histórico.

Las ideas que se han apuntado son de carácter tan general y abstracto que pueden ser aplicadas tanto a seres vivos como a máquinas o a sistemas mixtos seres vivos - máquinas. Por otra parte, ya desde hacía tiempo diversos hombres de ciencia habían puesto de manifiesto no pocas analogías, y hasta isomorfismos, en las formulaciones de distintas disciplinas científicas. Son éstas razones que, junto con la coyuntura de necesitar reunir a científicos de diferente ramo para la creación de sistemas complejos, han catalizado la generación de nuevas disciplinas como la Cibernética, La Teoría de Sistemas, La Teoría de la Información, la Investigación operativa y otras.

La siguiente figura resume, de manera muy incompleta, algunos hitos de estas encrucijadas de la ciencia que se comentarán en clase. El libro de Wiener, en 1.948, prácticamente simultáneo con la Teoría Matemática de la Comunicación de Shannon y Weaver, define así la Cibernética: la ciencia del control y de la comunicación en los seres vivos y en las máquinas.



FUENTE: LE MACROSCOPE

Otro movimiento importante, encabezado por el biólogo Von Bertalanffy y secundado por matemáticos, biólogos, biofísicos y economistas preconiza una Teoría General de Sistemas, la que -según De Rosnay- tiene por fin último describir y englobar formalmente el conjunto de sistemas que se encuentra en la Naturaleza. Fundan la "Society for General Systems Research" en 1.954 con los objetivos que, a continuación, se detallan (Von Bertalanffy): "Favorecer el desarrollo de los sistemas teóricos aplicables a varios sectores tradicionales del conocimiento. Sus funciones principales: 1° investigar los conceptos, leyes y modelos de misma forma en los diversos dominios y ayudar a los intercambios útiles de uno a otro; 2° impulsar el desarrollo de modelos teóricos adecuados en las ramas que carezcan de ellos; 3° minimizar la multiplicación de los esfuerzos teóricos en los diversos dominios; 4° promover la unidad de la ciencia mejorando las relaciones entre los especialistas".

Junto a todo esto, ciertos autores proponen un enfoque sistémico, enfoque transdisciplinario que desciende de la fecundación de la biología, de la teoría de la información, de la cibernética, de

la teoría de sistemas. No es una ciencia, ni una disciplina, sino - "una nueva metodología que permite reunir y organizar los conocimientos para una mayor eficacia en la acción" (De Rosnay).

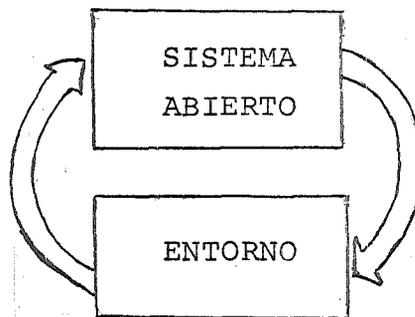
## 6. Clases, características y composición de los sistemas

### 6.1. Sistemas cerrados y abiertos

Sistema cerrado es aquel que no intercambia energía, ni materia, ni información con su entorno. Utiliza su propia energía potencial interna.

La Termodinámica clásica sólo considera esta clase de sistemas y en ellos se basan las grandes leyes de la fisicoquímica.

Un sistema abierto está permanentemente en relación con su entorno, con el que intercambia energía, materia e información por medio de las cuales mantiene o modifica su organización frente a la degradación producida a lo largo del tiempo. Un sistema abierto evoluciona en interacción constante con su entorno, como trata de esquematizar la próxima figura. (Recordemos que, como se decía en el apartado 2.2, entorno es todo lo que es exterior: ver "límite del sistema"). En adelante, nos interesaremos exclusivamente por sistemas abiertos.



Ejemplos: Todos los sistemas citados en los apartados 2 y 3.

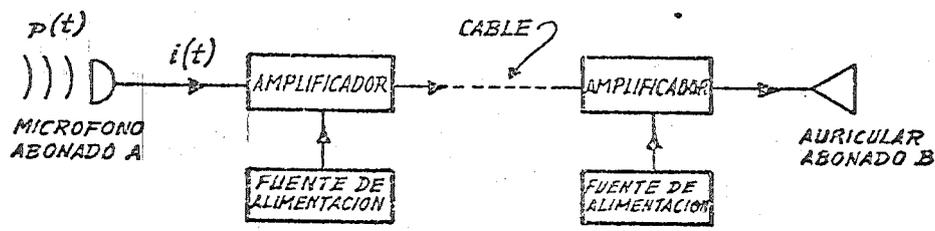
Un receptor de radio.

Una célula.

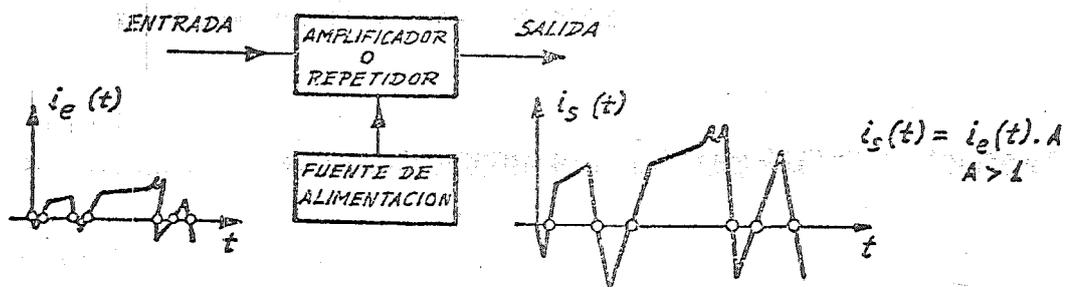
La Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación.

Una central telefónica.

En la figura siguiente tenemos un esquema de principios, - muy simplificado, de un sistema telefónico con repetidores. Se han evitado en él los recuadros correspondientes a los circuitos de conmutación que establecen la conexión de un abonado con cualquier otro (Muñoz Merino). El sistema es claramente abierto. Cualquiera de los am



(a)



(b)

Sistema telefónico con repetidores.

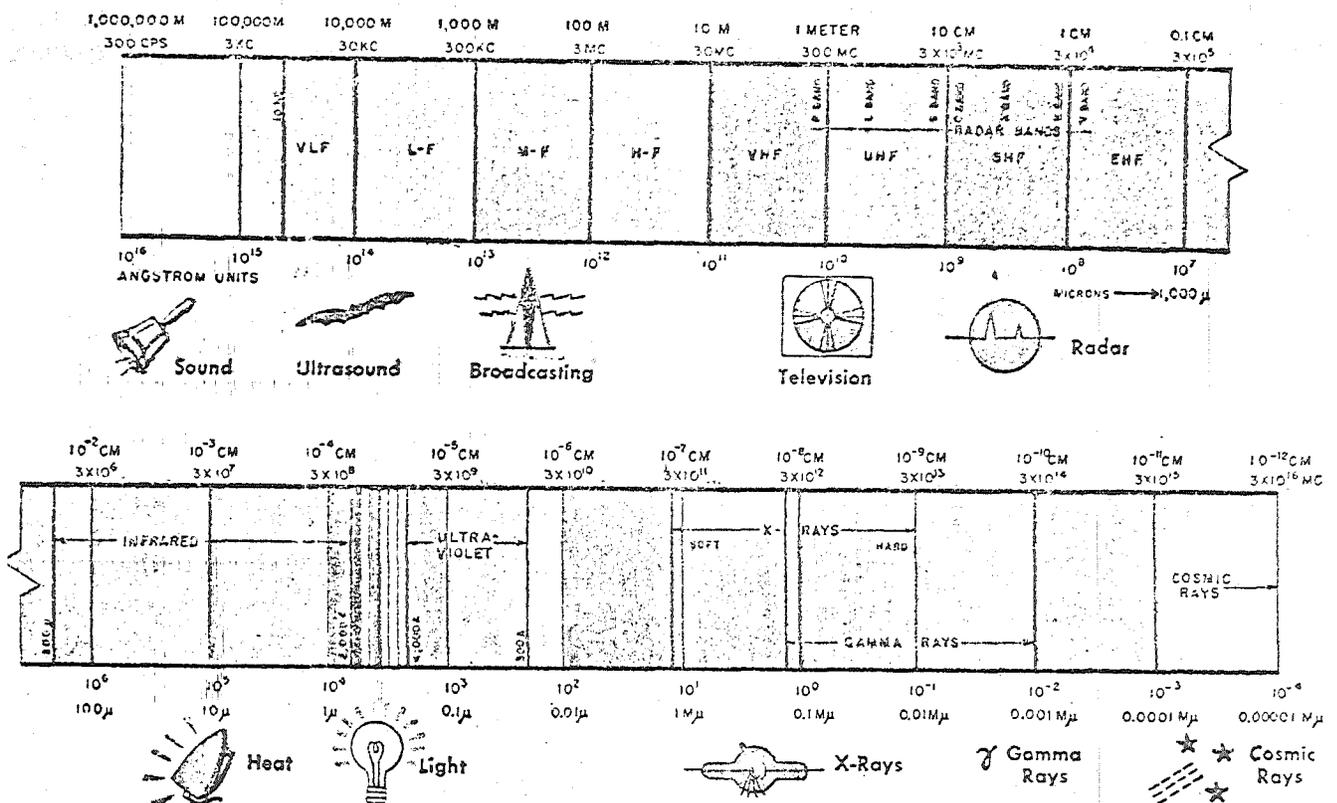
FUENTE: CIRCUITOS ELECTRONICOS

plificadores que lo componen es también un sistema abierto. Se dice

que un amplificador es, en términos generales, un dispositivo en el que la señal de una primera fuente controla el flujo de energía de una segunda fuente para producir una señal amplificada de la forma de la primera. En resumen, es un sistema que recibe entradas (información, energía) de su entorno y reacciona produciendo salidas (la misma información a mayor nivel energético) sobre el mismo. Su objetivo suele ser expresable por criterios de fidelidad y ganancia.

La teoría de los amplificadores se agota aquí, prácticamente, dicho un poco de forma exagerada. El resto es técnica y tecnología, cuya selección depende del entorno. Los elementos que compondrán un amplificador, sus interrelaciones y las técnicas que permitan diseñar el conjunto, así como el instrumental necesario para la prueba y mantenimiento del equipo material, dependerán de las características específicas del entorno.

El entorno vendrá definido básicamente por el margen de frecuencias seleccionado dentro del espectro electromagnético y, en segundo lugar, por las especificaciones concretas funcionales. (Ver figura del espectro electromagnético).



FUENTE: FUNDAMENTALS OF ELECTRON DEVICES

## 6.2. Rasgos estructurales y funcionales de los sistemas

De Rosnay nos los presenta de la manera siguiente. Son estructurales aquellos que se refieren a la organización espacial del sistema. Funcionales cuando dan cuenta del proceso, esto es, de los fenómenos dependientes del tiempo, u organización temporal (intercambio, flujo, transferencia, crecimiento....).

### 6.2.1. Estructura

**LIMITE:** Fronteras del sistema, que lo separan de su entorno

Ejemplos.- Membrana de la célula.

- Piel del cuerpo.

- La órbita del planeta Plutón en nuestro sistema solar, ya que la siguiente estrella más próxima dista del sol unas 3.000 veces más que el diámetro de la órbita de Plutón.

Observaciones.- Con gran frecuencia resulta difícil establecer los límites. Piénsese en establecer los límites de la E.T.S.I.T.

**-----NTOS:** Componentes que puedan ser enumerados y organizados en categorías, familias, o poblaciones.

Ejemplos:- Moléculas de una célula.

- Planetas y satélites.

- Transistores, resistores, capacitores en un circuito.

- Personal de una empresa.

**RESERVAS:** Donde pueden reunirse los elementos y donde se almacenan energía, información, materiales.

Ejemplos:- Yacimientos de hidrocarburos.

- Reservas de capital o de saber.

- Bibliotecas.
- Cintas magnéticas.

RED DE COMUNICACION: Permite intercambios de energía, información y materia entre los elementos y las diferentes reservas.

Ejemplos: - Tuberías, cables, nervios, venas, carreteras, líneas.

### 6.2.2. Función

FLUJO: Cantidad por unidad de tiempo de energía, información o elementos que circulan entre las reservas.

Ejemplos: - Número de automóviles producidos al día.  
- Número de viajeros por hora.  
- Número de bits por microsegundo.  
- Consumo en kilowatios/hora.

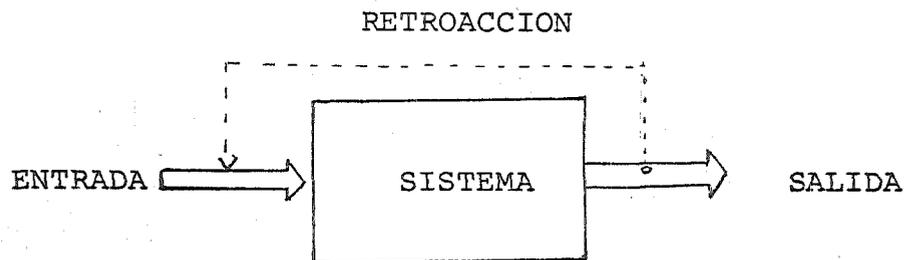
Los flujos hacen aumentar o disminuir el nivel de las reservas.

VALVULAS: Dispositivos que controlan los caudales de los distintos flujos. Aparecen como centros de decisión que reciben informaciones y las transforman en acciones.

Ejemplos: - Un director de empresa.  
- El hipotálamo.  
- Un termostato; un fusible.  
- Un sensor de densidad de tráfico conectado a un dispositivo accionador de las luces de semáforo.

**RETARDOS:** Resultantes de las distintas velocidades de circulación de los flujos, de las duraciones de almacenamiento o de los frotamientos entre los elementos del sistema.

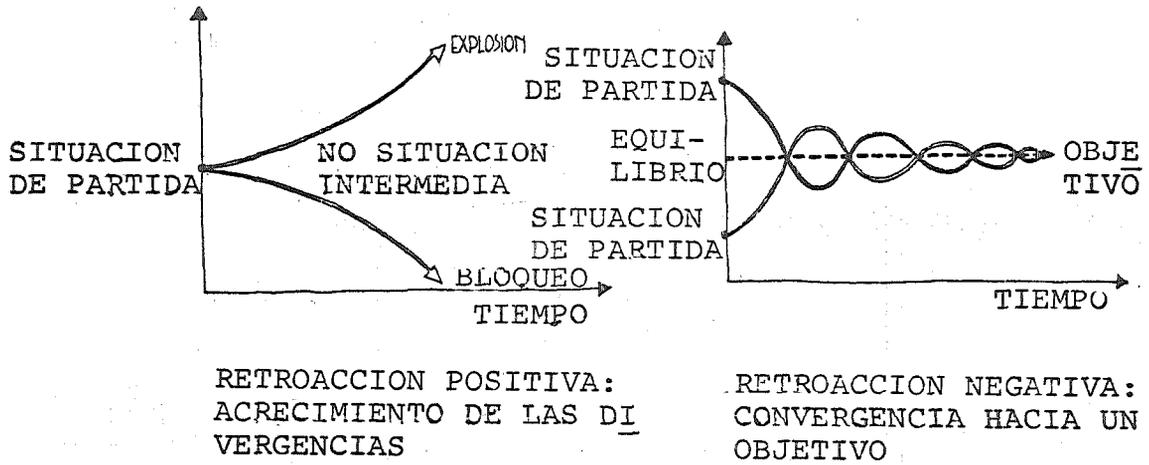
**BUCLES DE RETROACCION (FEEDBACK):** Las salidas y entradas de un sistema vienen separadas por el tiempo. Hay bu



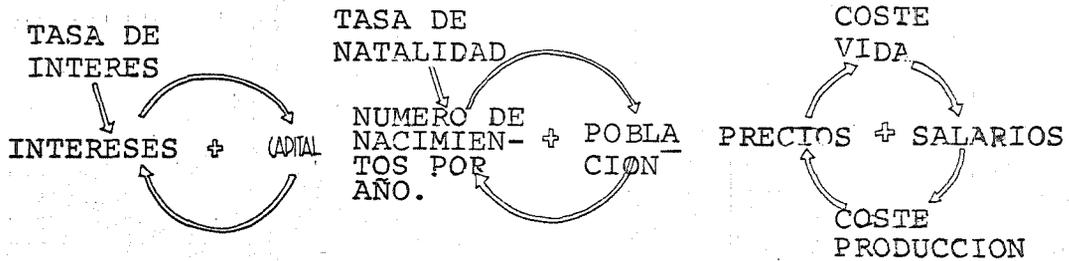
cle de retroacción (realimentación) cuando información sobre la salida es enviada hacia la entrada en forma de datos. Si tales datos contribuyen a facilitar y acelerar la acción en el mismo sentido que antes, se está en presencia de un bucle de realimentación positiva; sus efectos son acumulativos. Por el contrario, si los datos orientan la acción en sentido opuesto, el bucle es negativo. Sus efectos son estabilizantes, siempre que se den ciertas condiciones.

Sobre el "feedback" positivo descansa en principio, la dinámica del cambio de un sistema (crecimiento, evolución). También la explosión, el bloqueo, la inestabilidad. Ejemplos: reacción en cadena/crecimiento demográfico/capital a interés compuesto/inflación/cáncer incurable/quiebra de empresa/depresión/oscilación...

(Nota: veáanse los problemas del apartado 3.1 como ejemplos de sistemas con feedback positivo).



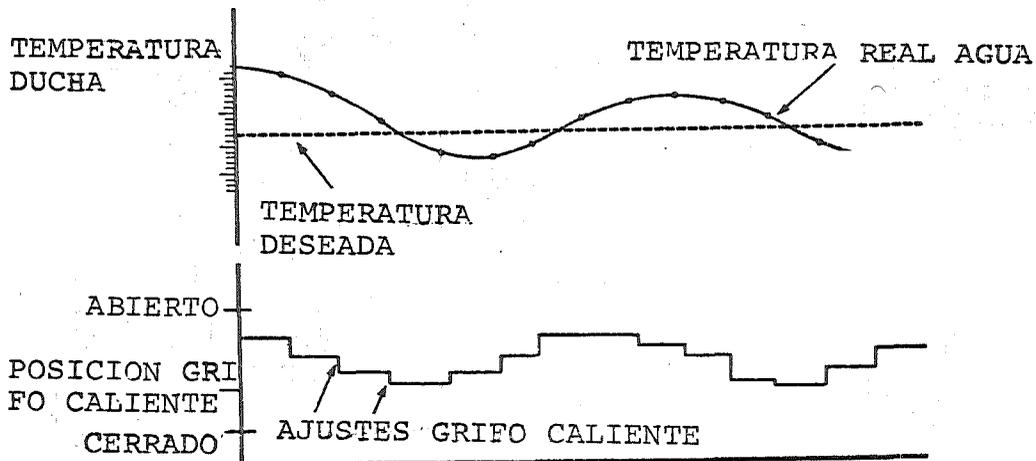
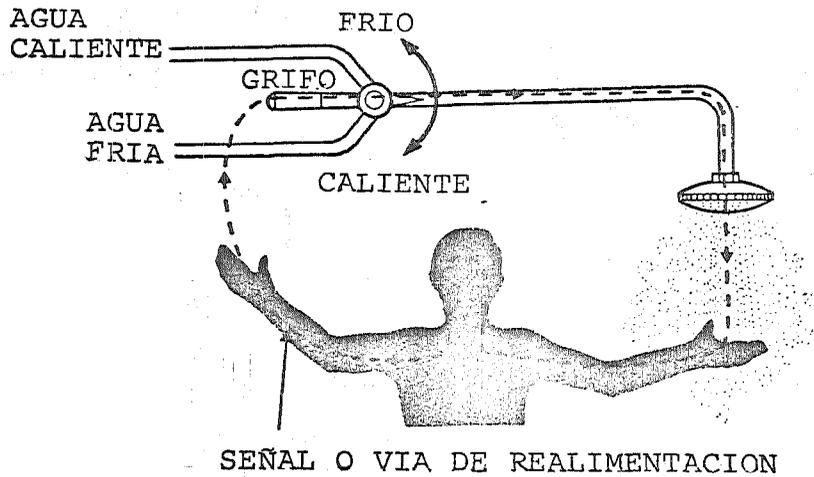
FUENTE: LE MACROSCOPE



FUENTE: LE MACROSCOPE

El "feedback" negativo regula, estabiliza, adapta, persigue un objetivo. Ejemplos: homeostasis fisiológica/calor regulado por termostato/servomotor/piloto automático/regulación de precios/cisterna con flotador.....

El sistema oscila en torno a una posición de equilibrio que no alcanza nunca, como puede verse en la figura del individuo de la



FUENTE: SYSTEMS

ducha. En ella aparecen conceptos de gran importancia en el campo de la ingeniería. La cibernética, de la que ha surgido modernamente toda la rama de la automática, los ha sistemizado y enriquecido. Los ha formulado matemáticamente y, con el apoyo de todo tipo de tecnología, constituyen hoy rama fundamental del moderno ingeniero.

El sistema hombre/ducha constituye un sistema con objetivo. En él distinguimos:

Objetivo: temperatura deseada.

Bucle de retroacción: mano/cerebro/mano (hay sensores, dispositivo de detección y comparación, y accionador. El proceso funciona por muestreo, en instantes discretos).

Retroacción negativa: agua demasiado caliente → aumento porcentaje agua fría, y al revés. Convergencia hacia el objetivo.

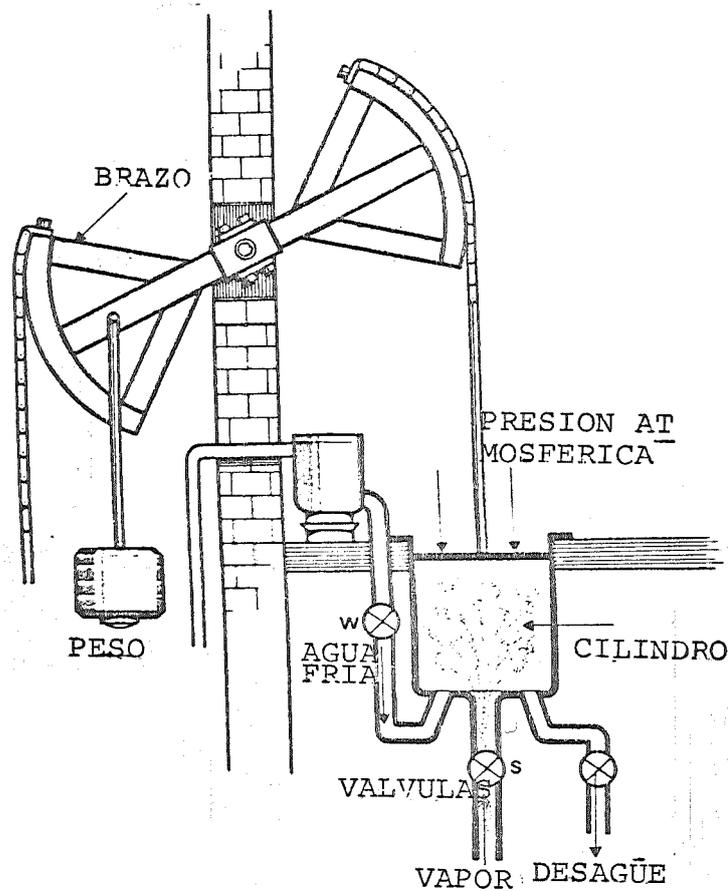
Retardo: intervalo temporal entre acción y resultado.

Perturbaciones: procedentes del entorno, en este caso la red de distribución de agua caliente.

La ingeniosa idea de cerrar un bucle de realimentación de manera automática, si bien se ha visto reconocida y sistematizada en los últimos tiempos -como hemos dicho- no es de hoy. Un precursor notabilísimo fué el regulador de Watt, que figura en el emblema de los ingenieros industriales, aplicado a la famosísima máquina de vapor. Maxwell, cuyas ecuaciones del electromagnetismo escucharán más de una vez los alumnos de esta Escuela, formuló años más tarde de la invención del regulador las leyes matemáticas que describen el comportamiento de dicho sistema. Pero antes que Maxwell y que Watt, un individuo llamado Humphrey, trabajando como controlador manual de las válvulas de admisión de una máquina de Newcomen (ver figura), ideó -para trabajar menos- un bucle de realimentación.

La máquina en cuestión, empleada sobre todo para sacar el agua de las minas, aprovechaba el efecto combinado de la presión atmosférica con el vacío creado por la condensación del vapor de agua en un cilindro. La secuencia de operaciones era sí:

1. Se abre la válvula S y entra vapor.
2. Cuando el cilindro se llena de vapor, se cierra S y se admite agua fría abriendo la válvula W.
3. Se cierra la válvula al descender el pistón y se vuelve a abrir S para recomenzar el ciclo.



MAQUINA ATMOSFERICA

FUENTE: SYSTEMS

Humphrey observó que la operación de abrir y cerrar válvulas guardaba íntima relación con el ascenso y descenso del pistón o del brazo y decidió materializar dicha interacción lógica entre los elementos por una interrelación mecánica. Para ello estableció las interconexiones pertinentes de manera que el propio brazo, al descender, comenzase a abrir la válvula de vapor y al subir abriera la de agua.

### 6.2.3. Dinámica de Sistemas

Los conceptos que, muy someramente, se han presentado en los apartados 6.2.1 y 6.2.2 constituyen la base sobre la que se construye la Dinámica de Sistemas, de Forrester. Esta es una disciplina dentro del movimiento cibernético-sistémico (ver figura del apartado 5) orientada a modelizar, simular y diseñar sistemas complejos en sus grandes líneas de comportamiento dinámico. Se ha aplicado a sistemas de transporte, a sistemas urbanos, a sistemas industriales y, por último, ha servido para plasmar un controvertido modelo del sistema mundial.

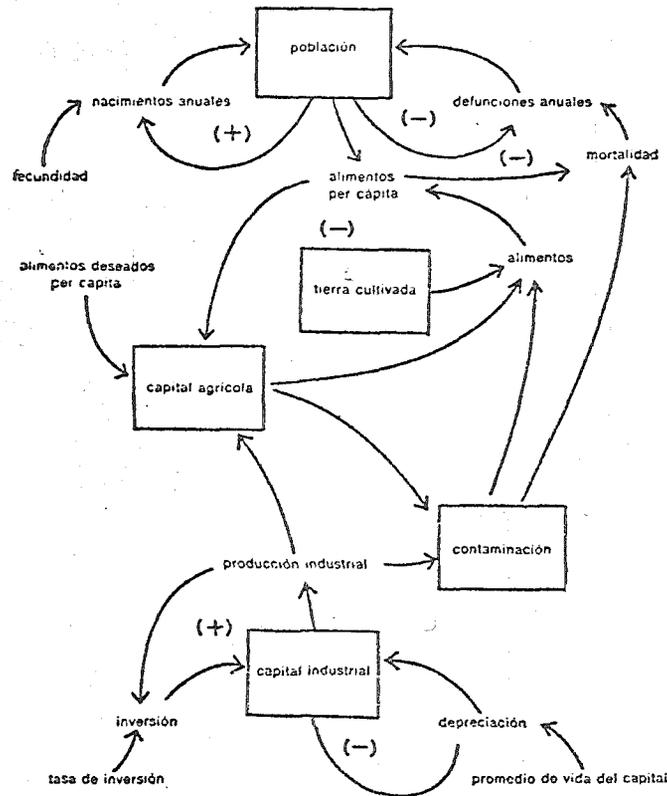
La pretensión del modelo era la de representar la actividad del mundo por referencia a los problemas de crecimiento enunciados en nuestro apartado 3.1. Según se ha visto, la tendencia al crecimiento se debe a bucles positivos de realimentación que hay que poner de manifiesto y, quizá, compensar mediante la introducción de adecuados bucles de realimentación negativa. ¿Será ésta, acaso, una nueva y desmesurada pretensión del hombre tecnológico?

El equipo humano que realizó el estudio y simulación del modelo mundial a que nos referimos (1er. informe al Club de Roma) utilizaba, -y esto es lo que aquí nos interesa- gráficos como el que recogemos a continuación (Meadows y otros)

El signo ((+) ó (-)) indica si se trata de un bucle positivo o negativo. Los trabajos del equipo Meadows iban encaminados a la búsqueda de alternativas para un equilibrio estable de la sociedad mundial. Veamos algunas de sus recomendaciones en materia de promoción de descubrimientos técnicos:

- a) Nuevos métodos de recolección de desechos, a fin de reducir la contaminación y preparar los materiales desechados para su reciclaje.
- b) Técnicas más eficientes de reciclaje, a fin de reducir las tasas de agotamiento de los recursos.

*Circuitos de retroalimentación de la población, el capital, la agricultura y la contaminación*



FUENTE: LOS LIMITES DEL CRECIMIENTO

- c) Mejor diseño de los productos para aumentar la duración de los mismos y permitir su fácil reparación, a fin de minimizar la tasa de depreciación del capital.
- d) Control de la energía solar incidente, que es la fuente energética más libre de contaminación.
- e) Métodos de control natural de las plagas, basadas en una comprensión más avanzada de las interrelaciones ecológicas.
- f) Avances médicos que disminuyan la tasa de mortalidad.

- g) Avances en materia de anticonceptivos que faciliten la -  
igualación de la tasa de natalidad con la decreciente ta-  
sa de mortalidad.

### 6.3. Estado de un sistema. Comportamiento.

Resulta difícil definir de manera general y precisa lo que se entiende por "estado de un sistema". Es más práctico introducir - su noción a través de distintos ejemplos o bien por lenguaje matemá- tico cuando se trate de sistemas bien formalizados como los sistemas lineales, los autómatas, etc.

Imaginemos vérnoslas con un sistema compuesto de ciertos - elementos, que poseen determinadas propiedades que podríamos definir, examinar y medir, No todas serán relevantes y, en particular, no lo serán sus propiedades fijas. Las que hayamos considerado relevantes, que llamaremos variables, adoptarán valores diferentes en el tiempo. Diremos que el estado del sistema es el conjunto de valores de las - variables escogidas en un momento determinado.

El concepto de estado nos facilita una primera aproximación al de comportamiento del sistema, que entenderemos como el movimien- to del sistema de un estado a otro.

Un ejemplo, elaborado por Ashby, puede ayudarnos a la com- prensión de lo anterior. Tenemos un cuadro de 20 x 20 lamparitas que se encienden o se apagan independientemente unas de otras. Las lampa ritas poseerán un cierto número de propiedades: color, forma, consu- mo, etc. pero sólo estamos interesados en que pueden estar encendi- das o apagadas, que son los valores de la variable retenida. El esta do del sistema es cualquiera de las configuraciones de las 400 bombi llas del cuadro ( $2^{400}$  combinaciones distintas) y el comportamiento se rá la trayectoria entre los estados a lo largo del tiempo.

Hay que considerar a Ashby, uno de los fundadores de la "So ciety for General Systems Research", como el iniciador del estudio -

de los sistemas a través de sus estados. Este enfoque ha resultado de una gran fecundidad para la elaboración de teorías matemáticas de diversas clases de sistemas, por lo que no podemos dejar de dar aquí aunque sólo sea una ligera noción (Klir).

Lo primero es establecer un conjunto de condiciones externas y un conjunto de estados internos del sistema. El sistema se define como una aplicación de  $(a, b_1)$  en  $b_2$ , donde  $a$  es un elemento del conjunto de condiciones externas y  $b_1, b_2$  lo son del conjunto de estados internos. Así, el siguiente estado  $b_2$  se define por la condición  $a$  y el estado  $b_1$ . Además de esta aplicación, puede introducirse otra de entradas y estados internos en estados de salida.

Cuando las variables son continuas, el sistema se describe cómodamente por ecuaciones diferenciales ordinarias en su forma canónica.

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$x_1, x_2, \dots, x_n$  variables representando el estado interno.

$Y_1, Y_2, \dots, Y_m$  variables representando las condiciones externas.

$f_1, f_2, \dots, f_n$ , funciones por las que los valores de las derivadas se asocian al siguiente estado del sistema.

Zadeh y otros autores han profundizado este enfoque, al que han llamado del "espacio de estado" y que constituye una generalización de la teoría general de circuitos, enfoque que se extiende a -

los sistemas con variables discretas en el tiempo y, últimamente, a sistemas con variables en conjuntos borrosos. También la teoría de autómatas finitos o de las máquinas secuenciales arrancan del mismo principio.

#### 6.4. Variedad y complejidad. Ley de la variedad requerida.

La variedad de un sistema guarda relación con el número y diversidad de elementos y con el número y diversidad de relaciones entre los mismos. Y por lo que acabamos de ver, con el número de posibles estados diferentes.

Un sistema es complejo cuando posee gran variedad, en las siguientes condiciones: a) sus elementos poseen funciones especializadas; b) están organizados en niveles jerárquicos internos (por ejemplo: en el cuerpo humano: las células, los órganos, los sistemas de órganos); c) los diferentes niveles y elementos individuales están unidos por una gran variedad de enlaces, de lo que resulta una alta densidad de interconexiones; d) las interacciones son de un tipo particular, por ejemplo, no lineales.

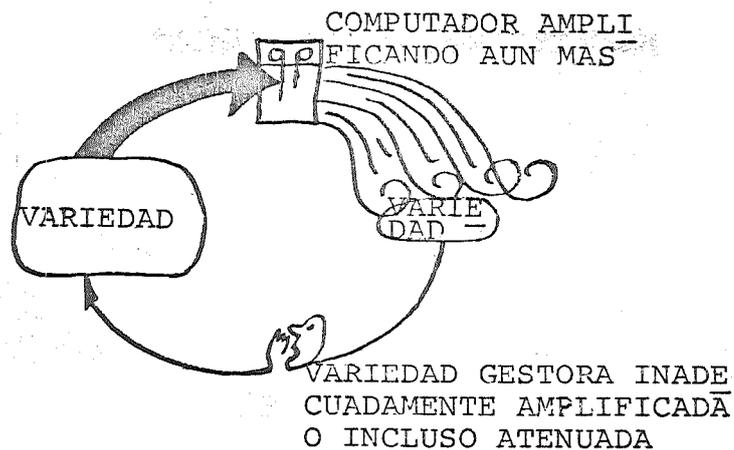
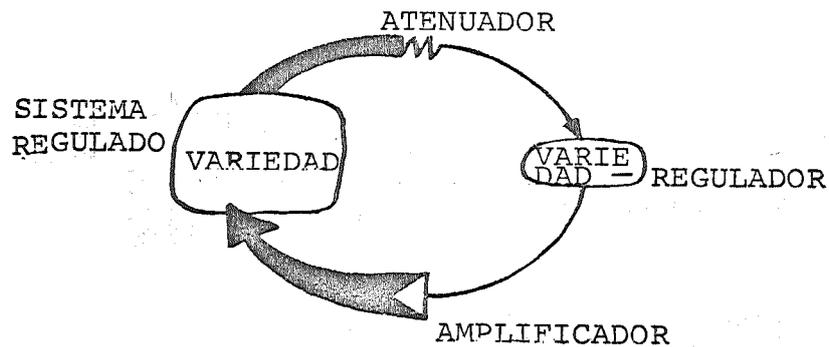
Ashby ha encontrado una ley aplicable a los sistemas regulados. Dice así: "para regular el comportamiento de un sistema el regulador debe poseer al menos tanta variedad como el sistema regulado". De él tomamos el siguiente ejemplo (Open University).

Un insecto tiene un nervio óptico con 100 canales, cada uno de los cuales puede vehicular 20 señales binarias por segundo. El insecto puede verse enfrentado a uno de entre diez peligros distintos, pudiendo presentarse todos independientemente durante el mismo segundo. ¿Puede el cerebro del insecto, al final del nervio óptico, recibir suficiente información para reconocer o detectar los diez peligros separadamente de forma que pueda ordenar la acción necesaria para sobrevivir?.

La respuesta es "sí" porque la variedad de peligros es de -

diez por segundo, mientras que el nervio óptico puede transmitir hasta 2.000 señales por segundo.

Es ésta una ley de gran trascendencia, que se ve constantemente transgredida en los sistemas organizativos creados por el hombre. Beer así nos lo hace ver demostrándonos cómo de forma habitual se sitúan los amplificadores y atenuadores de variedad justo en el lado contrario que indica la ley.



FUENTE: DESIGNING FREEDOM

Si las variedades no están adaptadas el sistema no puede estabilizarse. Suponiendo que el regulador tenga la variedad inferior sólo hay dos formas de cumplir la ley de Ashby. La primera es atenuar la variedad en el sistema, la segunda amplificar la variedad del regulador (parte superior de la figura anterior).

En la misma figura, pero en su parte inferior, Beer ilustra la mala utilización, por desconocimiento, de los amplificadores y atenuadores de variedad en el binomio gerente-ordenador ante la tarea de dirigir un negocio. El ordenador inunda de datos al gerente, que éste no puede digerir y en cambio no se emplea para amplificar las decisiones del mismo gerente hacia la diversidad y complejidad del sistema. Por paradójico que parezca, ésta, y no otra, es la forma habitual -aunque un poco distorsionada- de utilizar el computador en la mayoría de las organizaciones humanas.

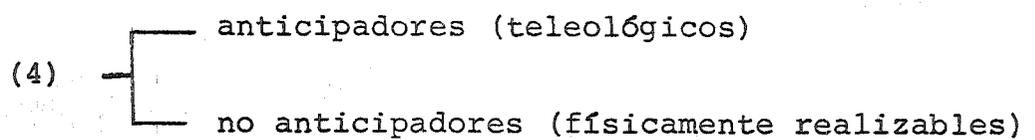
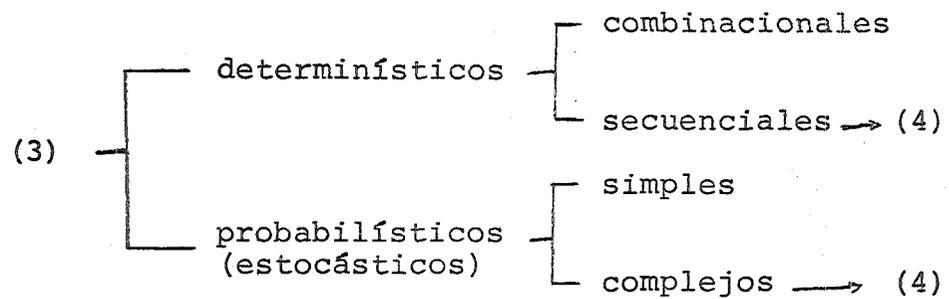
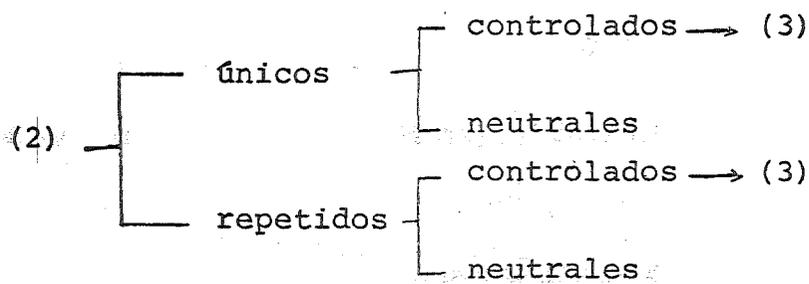
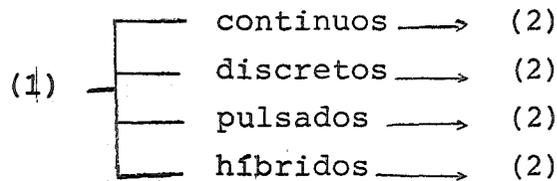
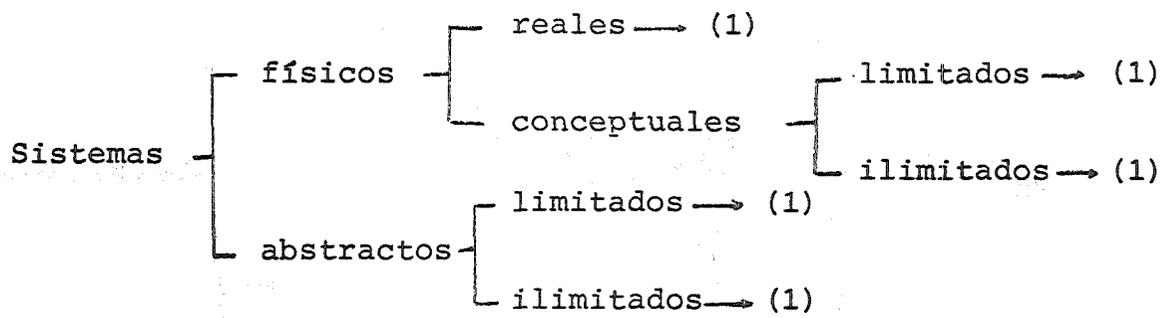
Una forma, muy discutible éticamente cuando se aplica sobre personas y técnicamente cuando se aplica sobre cosas, de satisfacer la ley de la variedad consiste en reducir la variedad del sistema regulado. Ejemplos entre muchos son el monocultivo, la publicidad, la educación. (Beer).

## 7. APROXIMACION FORMAL A UNA TEORIA GENERAL DE LOS SISTEMAS

Describiremos aquí con unas muy sucintas pinceladas los esfuerzos que, en el sentido de formalizar una teoría general no meramente ni superficialmente descriptiva, se están realizando desde hace algunos años. Del libro de G.C. Klir, 'An approach to general systems theory', tomamos los elementos para este apartado 7.

### 7.1. Clasificación de los sistemas, según Klir

Desde el punto de vista de la interacción entre los sistemas y su entorno, Klir distingue sistemas "absolutamente cerrados", "relativamente cerrados" y "abiertos". Pero ahora se abre una nueva clasificación en base a las variables del sistema y las relaciones entre esas variables.



Físicos: sus variables son mensurables.

Abstractos: sus variables son no mensurables.

Reales: las variables tienen existencia real.

Conceptuales: las variables tienen existencia supuesta.

Limitados: poseen un número finito de variables externas (ver apartado 6.3) y también es finito el número de propiedades subyacentes a la parte constante de su comportamiento.

Ilimitados: número infinito

Continuos: Las variables son continuas y conocidas en tiempo continuo en todo el espectro de la actividad del sistema. (Expresables por ecuaciones diferenciales).

Discretos: Las variables adquieren un número finito de diferentes valores discretos y se conocen sólo en instantes discretos de tiempo. (Expresables por un álgebra lógica).

Pulsados: Las variables son continuas, pero sus valores se conocen sólo en instantes discretos de tiempo. (Teoría de la interpolación y teorema de muestreo).

Híbridos: Sistemas compuestos por elementos discretos (o pulsados) y continuos.

Repetidos: Sistemas que satisfacen una misma definición y que pueden ser indistinguibles entre sí ajustando el nivel de resolución con el que es observado cada uno.

Controlados: Sistemas en los que se es capaz de clasificar las variables externas en dos categorías, las variables producidas por el entorno (o entradas al sistema) y las variables producidas por el sistema (o salidas del sistema).

Neutrales: No se es capaz.

Determinísticos: Todas las relaciones entre las variables principales de salida son funciones de las otras variables principales.

Probabilísticos: Por lo menos una de las relaciones no es representable por una aplicación (en el sentido matemático del término).

Combinacionales: Las variables vienen definidas por valores instantáneos de las variables externas.

Secuenciales: Por lo menos una de las variables no viene definida por el valor instantáneo de una variable externa.

No anticipadores: Ninguna variable principal está definida en base a valores futuros de variables externas, con respecto a la referencia temporal de las variables externas.

Anticipadores: Al menos una variable principal está definida en base a un valor futuro de una variable exterior.

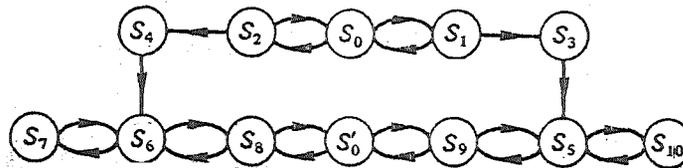
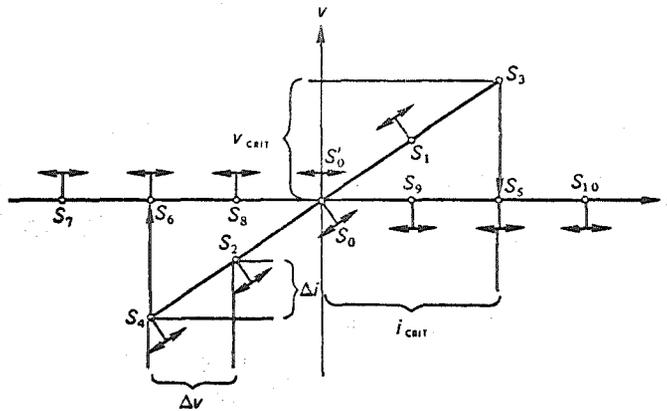
Ejemplos: Un computador digital es un sistema físico, real, limitado, discreto, repetido, controlado, determinístico, secuencial, no anticipador.

Una máquina de Turing es un sistema abstracto, ilimitado, discreto, repetido, controlado, determinístico, secuencial, no anticipador. (Esta máquina se estudia en el curso de Fundamentos de Ordenadores. Es concepto básico en la moderna Teoría de Algoritmos).

## 7.2. Estructura de transición entre estados

En el apartado 6.3 hemos establecido una descripción del comportamiento de un sistema a través del movimiento de un estado a otro del mismo. El grafo que representa todo el proceso de transformaciones entre estados se llama "estructura de transición entre estados" (en inglés "ST - Structure"). Veamos un ejemplo concreto muy sencillo para hacernos idea más concreta de cómo puede manejarse la noción de estado.

Sea un sistema definido por el voltaje y la corriente asociados a un resistor. Tomado un par ordenado de valores  $(v, i)$  como un estado instantáneo, distinguimos en la próxima figura algunos estados típicos, junto con las posibles transiciones (representadas por flechas) entre estados. Teniendo en cuenta que el voltaje  $V$  erit destruye al resistor (estados  $S_3$  y  $S_4$ ), la figura inferior presenta el proceso completo de transiciones posibles.



ESTRUCTURA DE TRANSICION DE ESTADOS DE UN SISTEMA DEFINIDO POR VOLTAJE Y CORRIENTE ASOCIADOS CON UN RESISTOR.

FUENTE: APPROACH TO GENERAL SYSTEMS THEORY

### 7.3. Formulaciones de un sistema

Cinco rasgos diferentes, que, lógicamente, deben ser consistentes entre sí, se establecen en el libro de Klir para definir un sistema.

#### 7.3.1. El conjunto de variables externas, junto con el nivel de resolución.

Se llama nivel de resolución a la determinación de conjuntos de aquellos valores de todas las variables observadas que se han de tomar en consideración, junto con un conjunto de aquellos instan-

tes de tiempo en que se quiere, y se puede, obtener los valores correspondientes de las variables.

Ejemplo: el sistema que representa el tiempo atmosférico en el Retiro de Madrid.

Variables y niveles:

Tiempo: medidas en 6 momentos diferentes y determinados del día.

Temperatura en la superficie y a 200 metros de altitud: márgenes especificados y precisión de 1°C.

Humedad relativa: margen dado y precisión de 1%.

Velocidad del viento en la superficie: margen y precisión, por ejemplo, de 2 Km/h.

Dirección del viento, presión barométrica, precipitación, -visibilidad, etc....

#### 7.3.2. Una actividad dada

Es el conjunto de las variaciones en el tiempo de todas las variables, consideradas al nivel establecido de resolución.

#### 7.3.3. Comportamiento permanente

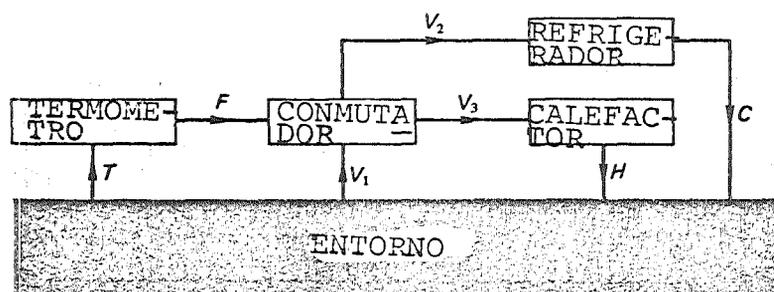
#### 7.3.4. Estructura real universo-conexiones (UC-Structure)

Se llama universo del sistema al conjunto de todos los elementos del sistema, definidos cada uno por un conjunto de variables y sus relaciones a un determinado nivel de resolución

El conjunto de variables externas comunes a dos elementos - se denomina conexión de estos dos elementos.

Ejemplo: un sistema para mantener la temperatura en una habitación entre 62°F y 70°F. (figura siguiente) Consta de 4 elementos: termómetro, conmutador, calefactor y refrige

rador, con las siguientes variables y relaciones.



FUENTE: APPROACH TO GENERAL SYSTEMS THEORY

- Termómetro: temperatura  $T$  (continua de  $30^{\circ}\text{F}$  a  $100^{\circ}\text{F}$ ), fuerza  $F$  (continua de  $0,03$  a  $0,1$  Nw). Comportamiento permanente expresado por  $F = 10^{-3}T$ .
- Conmutador: tres potenciales eléctricos diferentes ( $V_1, V_2, V_3$ , valiendo  $0$  ó  $110$  volt.), fuerza  $F$ . Comportamiento permanente expresado por la tabla:

$F$	$V_1$	$V_2$	$V_3$
Ningún valor	0	0	0
$F < 0,062$	110	0	110
$0,062 \leq F < 0,07$	110	0	0
$F \geq 0,07$	110	110	0

- Calefactor: potencial  $V_3$ , calor  $H$  por segundo (nada, o equivalente a  $1$  Kw). Comportamiento permanente expresado por la siguiente sentencia: "Si  $V_3 = 0$ ,  $H = 0$  y si  $V_3 = 110$  v.,  $H=1$

Kw".

- Refrigerador: potencial  $V_2$ , frío C por segundo (nada, o equivalente a -1 Kw). Comportamiento permanente: "Si  $V_2 = 0$ ,  $C = 0$  y si  $V_2 = 110$ ,  $C = -1$  Kw".

Tabulemos ahora, aunque el caso es trivial, las conexiones en el sistema y del sistema con su entorno.

#### CONEXIONES

entre	contiene
Termómetro y conmutador	Fuerza F
Termómetro y calefactor	ninguna variable
Termómetro y refrigerador	ninguna variable
Termómetro y entorno	temperatura T
Conmutador y calefactor	Potencial $V_3$
Conmutador y refrigerador	Potencial $V_2$
Conmutador y entorno	Potencial $V_1$
Calefactor y refrigerador	ninguna variable
Calefactor y entorno	Calor H
Refrigerador y entorno	Frío C.

#### 7.3.5. Estructura real de transición entre estados

Se remite al apartado 7.2.

### 8. JERARQUIA DE LOS SISTEMAS

Los sistemas, sean de un tipo o de otro, parecen formar parte de una gigantesca jerarquía, desde las partículas elementales de los núcleos atómicos a los organismos supraindividuales. Así los ven, al menos, autores como Von Bertalanffy y Boulding en el cuadro que extraemos de la obra del primero, "Teoría General de los Sistemas".

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

Nivel	Descripción y ejemplos	Teoría y modelos
Sistemas socio- culturales	Poblaciones de organismos (incluyendo los humanos); comunidades determinadas	Leyes estadísticas y po- siblemente dinámicas en dinámica de poblaciones, sociología, economía, - posiblemente historia. Comienzos de una teoría de los sistemas cultura- les.
Sistemas simbólicos	Lenguaje, lógica, matemá- ticas, ciencias, artes, - moral, etc.	Algoritmos de símbolos (p. ej. matemáticas, - gramática); "reglas del juego" como en artes vi- suales, música, etc.

FUENTE: TEORIA GENERAL DE LOS SISTEMAS

Del cuadro puede desprenderse la idea de "un querer abarcar demasiado" para quedarse al final como resultado práctico en la pura especulación teórica y en la filosofía de las cosas. Efectivamente, hay especulación -siempre tiene que haberla para avanzar en ciencia- pero hay también realizaciones científicas y estas se extienden cada vez más a los niveles más complejos. A título de ejemplo citaré la aparición de una "ingeniería de los sistemas sociales", cuyo "producto tiene que incluir, no sólo sistemas físicos y dispositivos, sino además sistemas humanos e instituciones sociales. Asimismo, tiene que considerar el impacto total del producto en la sociedad". Este párrafo lo hemos copiado de un número especial de los Proceedings of the I.E.E.E. (Institute of Electrical and Electronics Engineers) de Marzo de 1.975.

9. LA ERA DE LOS SISTEMAS Y EL PENSAMIENTO EXPANSIONISTA

Según un autor importante, R.L. Ackoff, el principio de la era de los sistemas puede situarse hacia los años 40'S. A esta nue-

va era le corresponde un entramado intelectual basado en las doctrinas del expansionismo y la teleología (en filosofía, doctrina de las causas finales) y en un nuevo sintético modo de razonamiento.

El expansionismo como doctrina sostiene que todos los objetos, acontecimientos y experiencias son partes de más amplios conjuntos. No niega que haya partes, sino que focaliza su atención en los conjuntos. Es otra manera de ver las cosas, diferente pero compatible con el reduccionismo.

De esta doctrina derivan directa o indirectamente la semiótica, la lingüística, la teoría de la comunicación, la cibernética y la teoría de sistemas. Von Bertalanffy vió el concepto de sistema como una cuña que podía abrir el punto de vista reduccionista y mecanista de la ciencia para enfrentarse más eficazmente con problemas de la naturaleza viva, ante los cuales la aplicación de la ciencia física era insuficiente, cuando no imposible.

El expansionismo conlleva un modo sintético de razonamiento, por contraposición al modo analítico. En análisis una explicación del total se deduce de explicaciones de sus partes. En el pensamiento sintético, algo que tiene que ser explicado se ve como parte de un sistema más amplio y se explica en función de su papel en ese sistema. Este modo sintético, cuando se aplica a problemas de sistemas, se llama enfoque sistémico (releer apartado 5) que, como puede comprenderse, a este nivel es sencillamente una metodología.

Anteriormente a estas ideas, un problema complejo se descomponía en problemas más sencillos afrontables por diferentes disciplinas. Cada disciplina resolvía su parte y las soluciones se ensamblaban en una solución del total. La nueva metodología promueve la creación de interdisciplinas (ver otra vez el apartado 5) o la conjunción organizada de varias disciplinas para atacar el problema como un todo. El primer método trabaja por diferenciación, el segundo por integración y ambos son complementarios en un plano científico.

La cuestión importante a subrayar aquí es que el segundo método va ligado como ineludible necesidad, como guía, al análisis,

diseño y control de los sistemas complejos que abundan en la tecnosfera (apartado 3) y que justifican posiblemente denominar "era de los sistemas" a esta época que nos ha tocado vivir.

Una última observación. El pensamiento expansionista y por consiguiente, las disciplinas científicas que de él toman sus raíces se han extendido relativamente poco. La prueba más evidente es que en la mayoría de universidades del mundo sigue vigente casi exclusivamente, en los programas y en los modos, el pensamiento reduccionista. En el ejercicio práctico de la economía, de la política, de la ingeniería, etc. no digamos.

#### 10. TECNOLOGIA DE Y PARA LA ERA DE LOS SISTEMAS

El mismo Ackoff distingue tres tipos de tecnologías como apoyatura de la era de los sistemas, los dos primeros desarrollados en la época de la revolución industrial.

El primer tipo de tecnología surgió con el invento del telégrafo, seguido del teléfono en el año 1.876 y la telegrafía sin hilos en 1.895. Ya en el siglo XX aparecieron la radio y la televisión. Todos estos aparatos mecanizan la comunicación, la transmisión de símbolos. Ya que los símbolos no tienen materia, su desplazamiento en el espacio no implica trabajo físico, hecho cuya significación profunda no ha sido apreciada hasta hace poco. En fin, esto se conoce con el nombre de telecomunicaciones.

Con el segundo tipo se hace referencia a los dispositivos e instrumentos que pueden observar y registrar propiedades de objetos y sucesos. Tales máquinas generan y recuerdan símbolos, que llamamos datos. El termómetro, el manómetro, el voltímetro, toda clase de sensores e instrumentación asociada, el radar, el sonar, etc., son ejemplos familiares de máquinas observadoras. La electrónica representó un avance definitivo en este terreno. Nuevamente, no hay trabajo físico.

El tercer tipo de tecnología se materializa en los computa-

dores, máquinas capaces de manipular símbolos en forma lógica. Parece que con esto se cierra, en teoría, el ciclo tecnológico de los símbolos. Se poseen máquinas para generar, almacenar, transmitir y manipular (transformar) símbolos.

Según Beer son las telecomunicaciones y los computadores herramientas que el hombre tecnológico ha creado y que le permitirán, si aprende a utilizarlas, es decir si emplea una metodología cibernética (expansionista, sistémica, decíamos nosotros en el apartado anterior)-manejar los sistemas complejos.

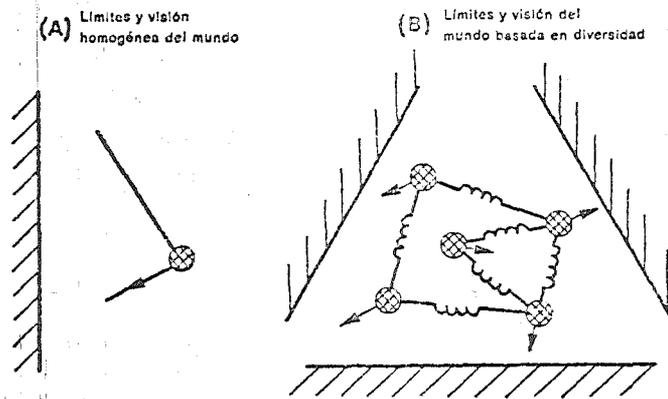
Con estas opiniones concluimos que, si estamos en la era de los sistemas, como parece, debemos movernos en un plano técnico que, en su vertiente metodológica, se resume en el apartado 9 y en su vertiente tecnológica en este apartado 10.

#### 11. UNA APLICACION DEL ENFOQUE Y LA TECNOLOGIA SISTEMICAS: MODELO COMPUTADO DEL MUNDO PARA UNA HUMANIDAD EN LA ENCRUCIJADA.

El 2º informe al Club de Roma modifica sensiblemente los planteamientos y los métodos del primero (ver apartado 6.2.3.). Sin entrar en su validez, ya que todo modelo, por el propio hecho de serlo, es discutible, creemos que pone de manifiesto de manera espectacular la metodología sistémica. Es muy recomendable la lectura del librito (Mesarovic y Pestel) donde se compendian, de cara al gran público y, en edición popular, los conceptos y resultados más importantes de dicho estudio.

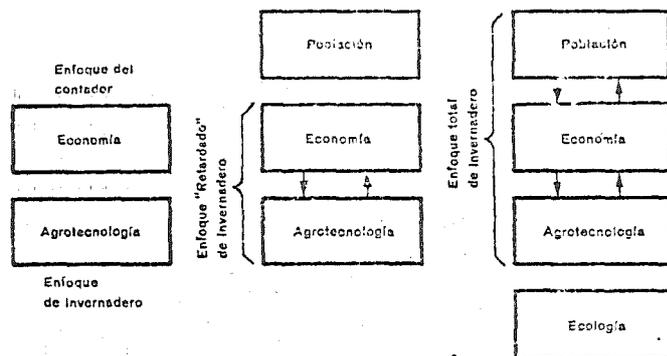
El modelo, respetando, en cierta medida, la ley de la variedad requerida, considera al mundo como una unidad o sistema, es decir como una colección de partes interactivas y mutuamente interdependientes, pero regionales, diversas y peculiares (Ver figura sobre los límites del mundo en la diversidad). Distingue 10 regiones diferentes en el mundo: (1) Norteamérica, (2) Europa Occidental, (3) Japón, (4) Australia, Sudáfrica y el resto de los países desarrollados de economía de mercado, (5) Europa Oriental, incluida la Unión Soviética, (6) América Latina, (7) Africa del Norte y el Oriente Medio, (8) Africa Tropical, (9) Sur y Sureste de Asia y (10), China. Las re

giones son subsistemas y cada subsistema es dividido en estratos o niveles, como indican las dos próximas figuras.



En la visión del "mundo único" o panorama homogéneo del desarrollo mundial, en el que las diferencias entre diversas partes del mundo se suprimen y se habla solamente acerca de indicadores globales y variables, todo el sistema alcanza sus límites al mismo tiempo y puede o no llegar al colapso. En la visión mundial basada en la diversidad, no existe el concepto de un límite para todo el sistema, sino que diferentes partes del mismo tienen que enfrentarse con límites distintos y a diferentes momentos; en este caso los posibles resultados alarmantes para todo el sistema dependen de la interrelación de las partes que lo constituyen. En una analogía más sencilla, el concepto de mundo homogéneo se compara con un péndulo que, para poder evitar el choque con un límite, tiene que reducir su velocidad y aceleración inmediatamente. En una analogía similar, la visión diversificada del mundo podría estar representada por un conjunto de pelotas conectadas por un sistema de resortes; cualquiera de las pelotas podría encontrarse con sus propios límites, pero otras podrían permanecer a alguna distancia de ellos, lejos de sus propias restricciones. El efecto de tal choque se propagará a través del sistema en relación con la fuerza de interacción desarrollada hasta ese punto; esto es, dependiendo del sistema de resortes. En todo caso, si ocurre el choque, éste será regional más que global, aunque todo el sistema en conjunto se vería afectado.

FUENTE: LA HUMANIDAD EN LA ENCRUCIJADA

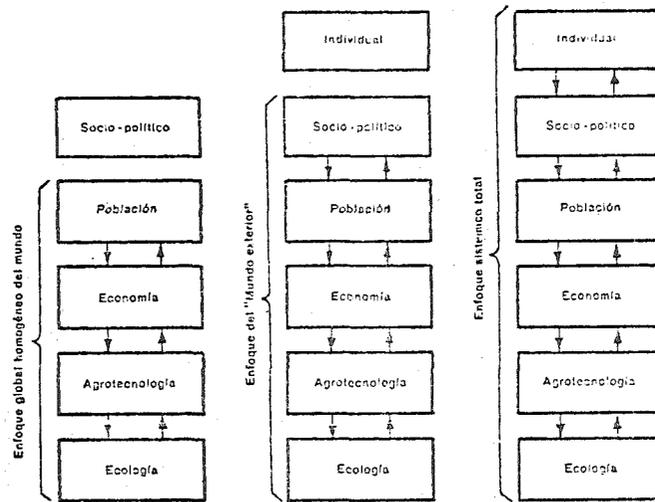


Dos enfoques para la solución del problema mundial de alimentos están actualmente de moda: el primero —el enfoque contenedor— supone que lo único que se necesita es un crecimiento del 3 ó 4 % del producto económico. ¿Pero puede la gente acaso comer dólares? El segundo —el enfoque de invernadero— sostiene que puesto que es posible incrementar sustancialmente el rendimiento en un laboratorio, podríamos en un momento dado alimentar, por ejemplo, a 30 000 millones de personas. Pero existe una duda en cuanto a si los recursos, económicos y físicos, incluidos la infraestructura y otros apoyos necesarios, están disponibles en las regiones en donde se implementará tal plan idealizado.

Se deben considerar simultáneamente y en conjunto, esto es, como un sistema, los aspectos de la economía y la agrotecnología. Se puede entonces hacer una evaluación realista (con este enfoque "retardado" de invernadero) para determinar qué cantidad de alimentos podría ser producida, en qué período de tiempo y en cuáles regiones. Pero existe el problema de relacionar los requerimientos dependientes del desarrollo de la población en diferentes regiones, con tal incremento de la producción de alimentos y de la nutrición.

Se deberán considerar como un sistema los aspectos de la economía, la agrotecnología y el desarrollo de la población. Utilizando este enfoque "total" de invernadero se supone que los alimentos necesarios llegarán a ser producidos. Sin embargo, el aumento de la producción de alimentos requeriría que se eliminara de las zonas laborables el mayor número posible de cultivos, excepto un número mínimo necesario para el sosten del hombre—; y que se utilizaran estrategias químicas agrícolas en una escala sin precedente. Pero, ¿podrá prevalecer durante un período de tiempo tal sistema de diversidad drásticamente reducida en el cual se ha eliminado gran parte de las especies, aun si se alcanzara?

FUENTE: LA HUMANIDAD EN LA ENCRUCIJADA



Se deben considerar como un sistema los aspectos de economía, agrotecnología, desarrollo de la población y ecología. Pero el mundo no es uniforme ni monolítico. Con el tiempo el lugar donde se pueden producir más alimentos será diferente al lugar donde se requieren alimentos. Algunas partes del mundo dependerán permanentemente de otras partes para su misma existencia diaria. ¿Cómo serán afectados los arreglos sociopolíticos internacionales por esta situación de los alimentos, que se convertirían en un arma potencial?

Se tendrán que considerar como un sistema los aspectos de economía, agrotecnología, desarrollo de la población, ecología y los arreglos sociopolíticos globales. El surgimiento y existencia de un sistema integrado global requeriría un cambio en las actitudes y valores del individuo respecto a la sociedad y a la comunidad mundial, así como respecto a los sacrificios requeridos para proteger las generaciones futuras en contra de crisis significativas.

Se deberán considerar como un sistema, en cualquier estudio práctico y realista de la situación mundial de los alimentos, los aspectos de economía, agrotecnología, ecología, población, arreglos sociopolíticos, valores y normas individuales. Cualquier cosa menos que esto no será suficiente, pues sería altamente irresponsable en relación con las generaciones futuras.

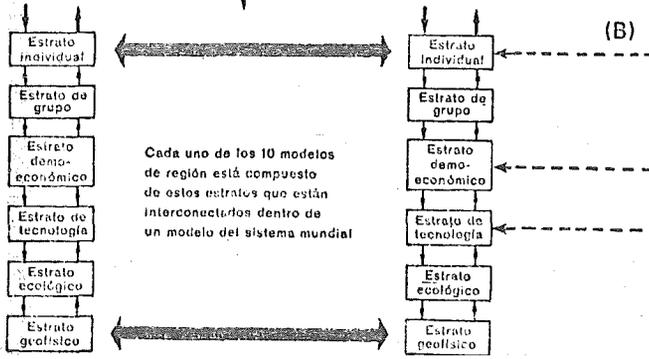
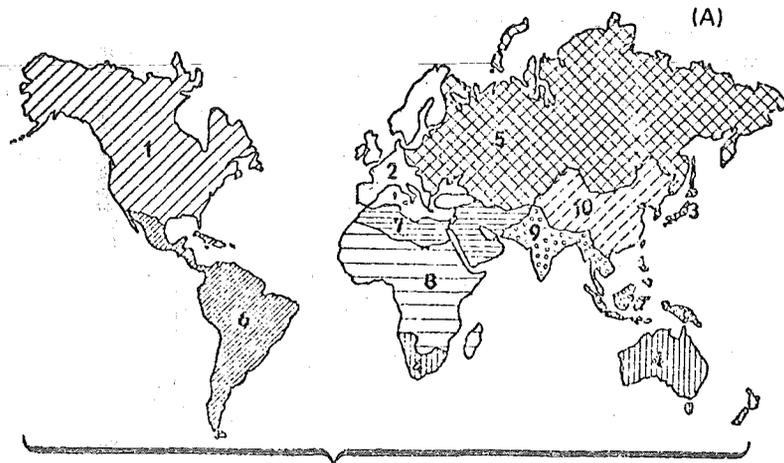
FUENTE: LA HUMANIDAD EN LA ENCRUCIJADA

Es importante fijarse en cómo el enfoque sistémico total, - que es el que finalmente considera el estudio, contempla estratos - que van desde lo individual a lo ecológico.

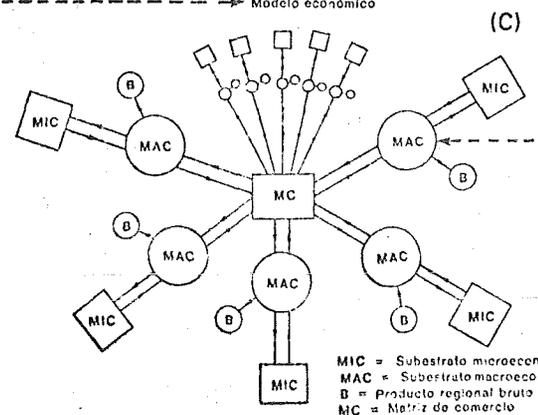
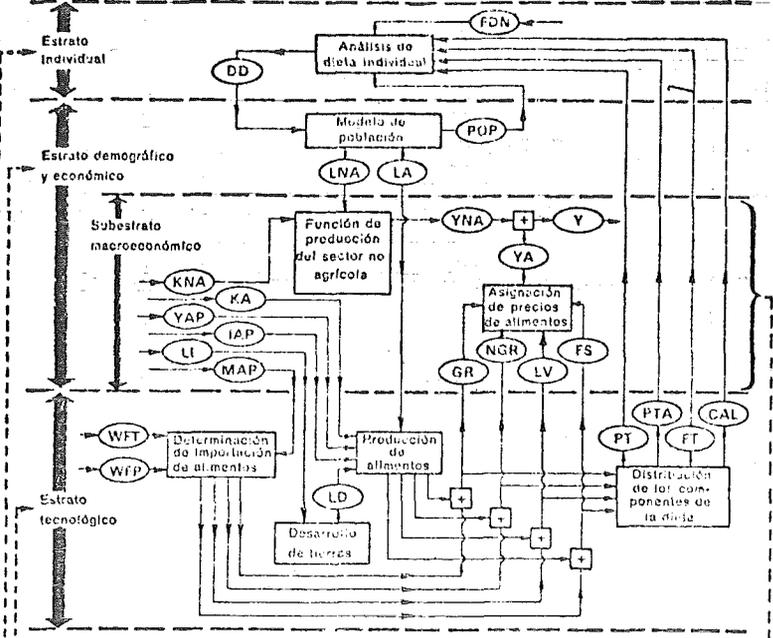
La interdependencia de todos los modelos regionales se expresa a través de interconexiones y mecanismos de intercambio. Para algunos estratos se utilizan representaciones con diferentes niveles - de resolución (diferentes grados de detalle).

La siguiente figura, tomada del mismo libro, presenta algunos (para simplificar) componentes y variables en las interconexiones de tres submodelos -población, economía y producción agrícola- - para propósitos de análisis de la oferta de alimentos. Naturalmente, la adjunción de tal figura en este texto no pretende esclarecer ninguno de los contenidos del modelo, sino sólo dar una idea del enfoque del problema. Piénsese que el sistema mundial se ha plasmado en un - modelo interactivo de unas 100.000 ecuaciones soportadas por un com- putador. Los estratos individuales y de grupo se incluyen mediante - relaciones cualitativas y lógicas y su manejo se apoya en una búsque da heurística de toma de decisiones en un marco de restricciones ins titucionales, económicas, tecnológicas, etc..

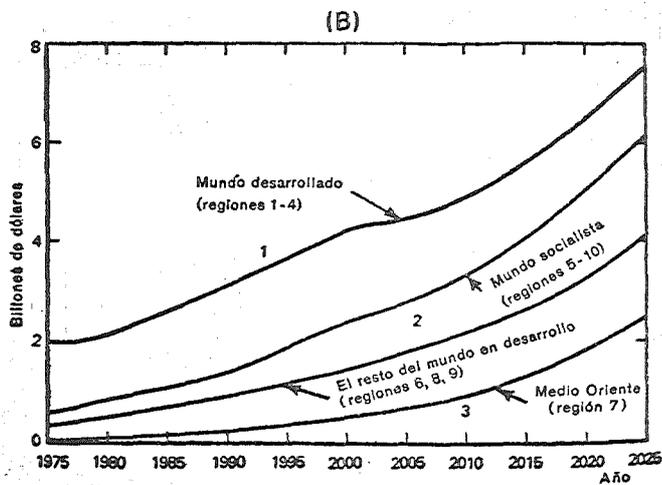
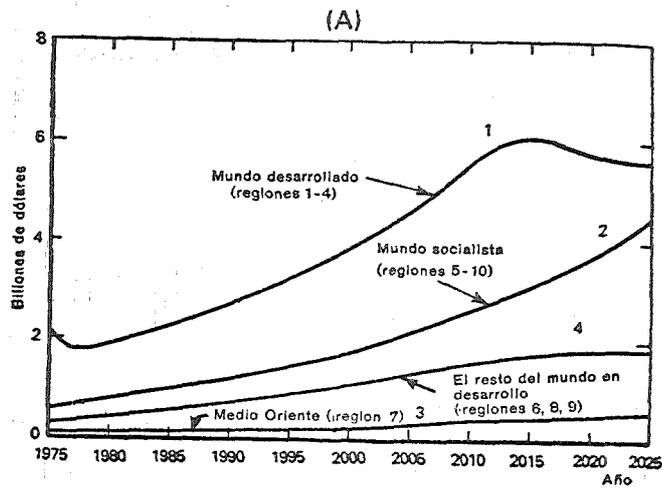
Para acabar con descripción tan somera de trabajo tan impor tante, digamos que el modelo prevé la contemplación de distintos es- cenarios o alternativas que retrotraen hacia nosotros el futuro (fu- turo condicionado a las hipótesis del modelo). Por vía de ejemplo, - la última figura nos describe el desarrollo de las regiones en ba se a dos escenarios, de precio barato y precio óptimo del petróleo - respectivamente. Contra lo que pudiera suponerse (comportamiento con traintuitivo) el precio barato no es bueno para nadie, ni siquiera - para los países desarrollados. La deducción de que el precio bajo es conveniente para los países desarrollados se basa en un análisis par cial del sistema y en la búsqueda de objetivos a corto plazo, que - conducirían a grandes problemas a largo plazo. Tal deducción se basa en el pensamiento reduccionista aplicado a un problema muy complejo lo que, como ya hemos señalado en el apartado 9, es inadecuado cuan- do no contraproducente.



EJEMPLO SIMPLIFICADO DE INTERCONEXIÓN VERTICAL DE ESTRATOS (U)



*Comparación del desarrollo mundial a largo plazo en un escenario de precios bajos del petróleo y en un escenario con precios óptimos del petróleo*



FUENTE: LA HUMANIDAD EN LA ENCRUCIJADA

Existe, por el contrario, un precio óptimo que, si el modelo funciona, sería beneficioso a la larga para todas las regiones.

## 12. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Se han utilizado en el texto por el nombre de su autor y al pie de las figuras por el título de la obra.

- (1) N. Jordan  
Themes in speculative psychology  
Tavistock Publications, 1.968.
- (2) J. de Rosnay  
Le Macroscopie. Vers une vision globale.  
Seuil, 1.975
- (3) B. Langefors  
Theoretical Analysis of Information Systems  
Studentlitteratur Auerbach, 1.973.
- (4) Scientific American  
La Biosfera  
Alianza, 1.972
- (5) B. Ward y R. Dubos  
Una sola Tierra  
Fondo de Cultura Económica, 1.972
- (6) R. Greene  
Las hormonas del organismo humano  
Guadarrama, 1.970
- (7) L. Von Bertalanffy  
Teoría General de los Sistemas  
Fondo de Cultura Económica, 1.976.
- (8) H. A. Simon  
The Sciences of the Artificial  
The M.I.T. Press, 1.969. (Existe versión española).
- (9) I. Illich  
Nemesis Médica. La expropiación de la salud  
Barral, 1.975.

- (10) R. Ackoff  
Redesigning the future. A systems approach to societal problems.  
J. Wiley, 1.974
- (11) E. Muñoz Merino, coordinador  
Circuitos Electrónicos, Vol. 1  
E.T.S.I.T.M., 1.975
- (12) K. R. Spangenberg.  
Fundamentals of electron devices  
McGraw-Hill, 1.957
- (13) D. H. Meadows et al.  
Los límites del crecimiento  
Fondo de Cultura Económica, 1.972.
- (14) G. J. Klir  
An approach to general systems theory  
Van Nostrand, 1.969
- (15) S. Beer  
Designing Freedom  
Wiley, 1.974.
- (16) Special issue on social systems engineering  
Proceedings of the I.E.E.E. Marzo 1.975
- (17) M. Mesarovic y E. Pestel  
La humanidad en la encrucijada  
Fondo de Cultura Económica, 1.975.