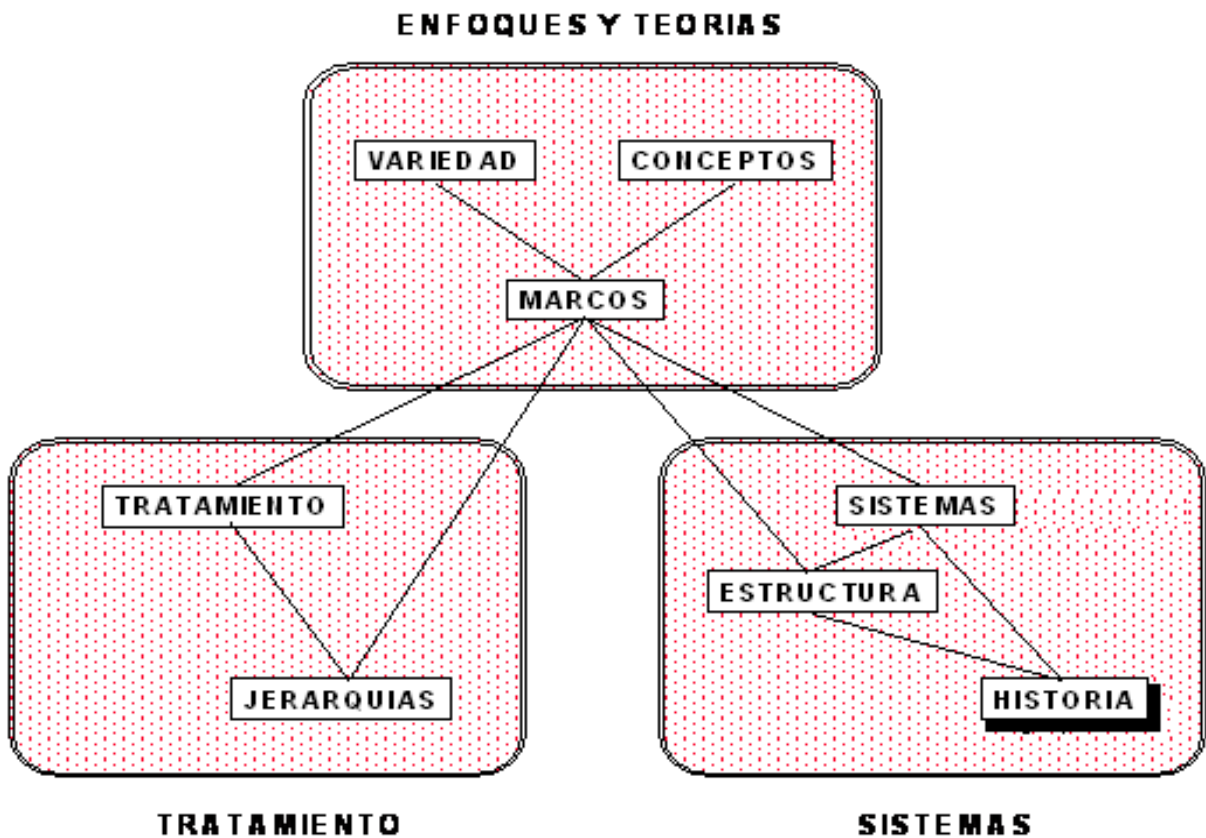
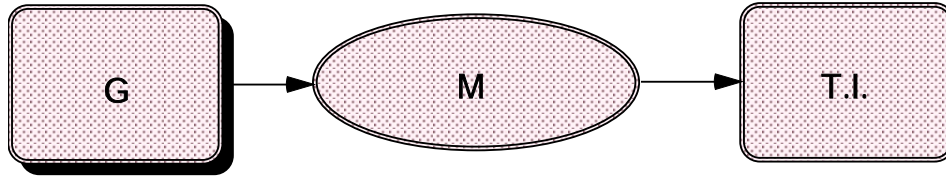


Sistemas: visión estructural y visión funcional

Introducción
Definición de sistema
Sistemas abiertos y complejidad
Interpretación funcional y estructural de los sistemas
El sistema desde el punto de vista estructural
 Límites de un sistema
 Elementos
 Interacciones
 Entorno
 Jerarquía de niveles
El sistema desde el punto de vista funcional
 Entrada y salida
 Realimentación, positiva y negativa
 No linealidades
 Equilibrio y estabilidad
 Adaptación y cambio
 Evolución y emergencia
 Simulación
El sistema, como enfoque global
Resumen
Bibliografía

"Tanto en la ciencia como en la ingeniería, el estudio de "sistemas" está convirtiéndose en una actividad cada vez más popular. Su popularidad responde más a una acuciante necesidad de sintetizar y analizar la complejidad que al desarrollo de un cuerpo de conocimiento y unas técnicas para tratar la complejidad. Para que esta popularidad sea algo más que un capricho, la necesidad ha de dar paso a alguna invención y proporcionar una base a las ideas sobre sistemas." [Simon, 1969]

En virtud de la popularidad que reconoce Simon, la palabra sistema se ha convertido en un comodín en muchas ciencias: sistemas informáticos, ecosistemas, sistemas orgánicos, sistema de ecuaciones, sistema circulatorio, sistema de impuestos, sistema inmunológico, sistema estelar. Todos ellos no son más que unos pocos ejemplos de lo que se ha venido en llamar la "ciencia de los sistemas", es decir, el estudio de las propiedades comunes a todos los sistemas.



1. Introducción

En este capítulo vamos a presentar algunas de las ideas relacionadas con los sistemas. A lo largo de todos estos apuntes, ha aparecido repetidas veces el concepto de sistema, del que existe una noción intuitiva que se utiliza con profusión en muy diversas ciencias. El primer objetivo que nos vamos a marcar en este capítulo es definir qué es un sistema, tarea nada fácil,

como veremos. Una vez definido el sistema podemos pasar a estudiar sus características, esas características generales que aparecen en todos los sistemas, independientemente de la aplicación. Los conceptos que estudiaremos son importantes desde el punto de vista de la complejidad, porque a nadie que haya leído con detenimiento estos apuntes se le escapará la estrecha relación que tienen con muchas ideas tratadas en otros capítulos. Este pretendemos que sea una pequeña guía para el estudio de los sistemas, intentando siempre basarnos en ideas intuitivas y dejar el formalismo matemático de lado.

2. Sistemas abiertos y complejidad

La complejidad en los sistemas alcanza su verdadera dimensión cuando se consideran sistemas abiertos, es decir, sistemas que interactúan con su entorno, viéndose influidos por las variaciones de éste e influyendo a su vez en él. Puede parecer trivial considerar sistemas abiertos y sistemas cerrados pues muy pocos sistemas, excepto los artificiales, se pueden considerar como cerrados. La diferencia está en la complejidad.

Durante mucho tiempo, en diversos campos de la ciencia se estudiaban única y exclusivamente sistemas cerrados, considerar la más mínima interacción con el exterior suponía un aumento inabordable de la complejidad. La economía es un ejemplo de ello, solo recientemente se ha empezado a ver la importancia del entorno en muchos aspectos: el entorno ecológico, las comunicaciones, la existencia de un mercado mundial, las repercusiones sociales de determinadas políticas, etc. La biología, como en muchas otras cosas, fue una de las primeras ciencias en ver la necesidad de ampliar los estudios de los objetos al entorno que los circunda. El ejemplo más claro de ello es la teoría de la evolución. Pero en la mayoría de los casos, considerar sistemas abiertos es más fácil de decir que hacer. En electrónica, por ejemplo, hasta el más novato de los estudiantes sabe que hay multitud de interferencias, ruidos, y efectos parásitos que provienen del entorno del circuito, sin embargo, la teoría de circuitos procede como si estos fueran sistemas perfectamente aislados y la protección contra el ruido es aumentar la potencia de la señal para que supere a éste. ¿Es factible desarrollar una teoría de circuitos que tenga en cuenta todas las interacciones con el entorno?, y esas interacciones no se limitan a las interferencias, hay intercambio de calor, influencia de la humedad en el ambiente, temperatura de trabajo, resistencia física de los materiales e infinidad de otros parámetros en los que la mayoría de las veces ni siquiera se piensa.

Y no es exagerado hablar de sistemas "tan abiertos". En muchos ordenadores actuales, la arquitectura hardware está preparada especialmente para poder soportar esos errores "inexplicables" que aparecen por el simple hecho de que el ordenador está en un entorno real (rayos cósmicos, variaciones de las condiciones de trabajo, aleatoriedad cuántica, etc.).

3. Definición de sistema

Es difícil definir la noción de sistema. Klir [Orchard, 1977] reconoce que existe una teoría de sistemas para cada definición que se adopte y que cada definición está condicionada por el problema que se intenta resolver. Existen multitud de definiciones que avalan esta afirmación. De hecho esta es una de las críticas que se hacen más frecuentemente al enfoque sistémico como teoría general, ya que muchas de las definiciones que se utilizan dependen en gran medida de la aplicación.

Existen, sin embargo, una serie de rasgos genéricos que recogen la mayoría de las definiciones de sistema, entre ellas, aunque no necesariamente por ese orden, la existencia de varios elementos que se relacionan entre sí y la existencia de un objetivo común. La interpretación de estas características comunes, así como el hecho de resaltar unas más que otras, es lo que generalmente viene condicionado por la aplicación que se quiere hacer de la definición. Por citar alguna, a continuación se recoge la definición de sistema que propone Gómez-Pallete, definición que utiliza en un estudio sobre organización y gestión de empresas:

Un sistema es

- 1.- un conjunto de elementos
- 2.- relacionados entre sí
- 3.- actuando en un determinado entorno
- 4.- con el fin de alcanzar objetivos comunes
- 5.- y con capacidad de autocontrol

Klir sostiene que existen diferentes posibles definiciones de sistemas, según cómo se interpreten estos últimos. De acuerdo con su jerarquía epistemológica de sistemas (ver el capítulo de marcos conceptuales), y su estudio formal de los mismos, propone una serie de definiciones que recogemos en el cuadro adjunto.

Como definición básica de los posteriores trabajos de Klir, podemos citar la definición de sistema de Ashby [1956]: “Cuando se establece un conjunto de variables como resultado de nuestra interacción con el objeto que nos interesa, entonces se dice que se distingue un sistema en el objeto”.

Las cinco definiciones básicas que propone Klir se basan en los rasgos fundamentales de los sistemas: cantidades observadas a un nivel determinado de resolución, actividad de las cantidades en el tiempo, relaciones invariantes en el tiempo entre esas cantidades, y propiedades que determinan estos rasgos. A partir de estas cinco definiciones básicas se pueden establecer otras definiciones en función de rasgos permanentes pero no fundamentales que exhiba cada grupo de sistemas particular. Las cinco definiciones básicas son las siguientes:

Un sistema es un conjunto dado de cantidades, consideradas a un nivel de resolución dado.

Un sistema es un conjunto de variaciones en el tiempo de las cantidades que se consideran.

Un sistema es una relación dada, invariante en el tiempo, entre valores instantáneos y/o pasados y/o futuros de las cantidades externas. La relación puede admitir una interpretación probabilística pero no es necesario hacerla.

Un sistema es un conjunto dado de elementos, sus comportamientos permanentes, y un conjunto de acoplamientos entre los elementos y entre los elementos y el entorno.

Un sistema es un conjunto de estados y un conjunto de transiciones entre los estados. Se puede admitir una interpretación probabilística de la ocurrencia de transiciones de un estado a otro, pero no es necesario hacerla.

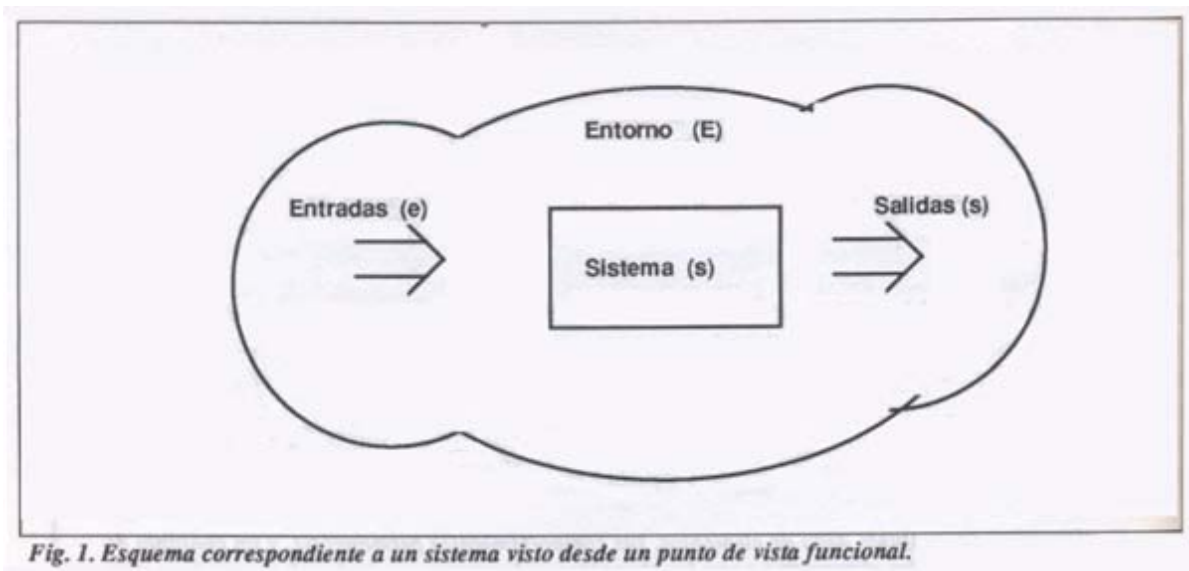
Cada una de las definiciones está incluida en la siguiente, apareciendo así una jerarquía interpretativa de los sistemas. La primera definición es el "esqueleto" del sistema, de qué elementos se va a construir. La segunda definición se apoya en la primera pero destaca la actividad del sistema, es decir, los valores que van tomando a lo largo del tiempo las cantidades que conforman el sistema. La tercera definición supone las dos anteriores y se centra en las relaciones que ligan las diferentes cantidades del sistema, que se conocen por comportamiento del sistema. La cuarta definición toma los elementos y sus comportamientos (y por tanto las tres definiciones anteriores) y define el sistema a través de éstos y los acoplamientos entre ellos. La quinta definición es una especie de visión dinámica de la cuarta, en virtud de los elementos y sus estados, el sistema se define como transiciones entre esos estados.

4. Interpretación funcional y estructural de los sistemas

Consideremos un sistema cualquiera. De alguna forma el observador ha debido definirlo, delimitando entre otros aspectos, unas "fronteras" entre lo que consideramos objeto de nuestro estudio y el entorno en el que está inmerso. A través de estas fronteras se relacionarán uno con el otro de alguna manera. Pues bien, si atendemos a estas interrelaciones para caracterizar el objeto estudiado, sin importarnos su naturaleza "interna", estamos centrándonos en el aspecto funcional. Puede resumirse esta actitud diciendo que lo que le interesa es el "qué hace". Pero también podemos mirar dentro de esa "frontera" definida, e investigar sobre los elementos que componen el sistema, las relaciones que hay entre ellos,

cómo están organizados. Este tipo de enfoque es el estructural: lo importante es el "cómo lo hace".

Sea un sistema (S) como el de la figura 1, inmerso en un entorno (E). Agrupemos todas las influencias que reciba, llamando entrada (e) a este agregado. Y hagamos lo mismo con todas las formas en que el sistema actúa sobre el entorno (salidas, s).



Podemos pensar en el sistema como "caja negra", de la que nada sabemos sobre cómo es por dentro, pero que estudiamos en su relación con el exterior. Así buscamos una relación funcional entre la salida y la entrada, de la forma $s = S(e)$ (esta relación es la tercera definición de sistema en la jerarquía de Klir estudiada en Marcos Conceptuales). En este caso estamos utilizando un enfoque funcional, en el que no interesa cómo se consigue esa función de transferencia sino sólo lo que hace.

Pero también podemos considerar un sistema como un conjunto de componentes (C) e interacciones entre ellos (I). Es el caso de la segunda figura. En este caso nuestro interés se centrará en conocer por completo la estructura $S = I + C$ (que coincide con la cuarta definición de sistema de Klir).

Ahora lo que se utiliza es una aproximación estructural, en la que lo que interesa conocer es la organización interna del sistema.

Si conocemos completamente la estructura de un sistema (todos sus elementos componentes, el comportamiento de los elementos y la forma como se relacionan entre sí), tenemos los datos suficientes como para calcular la función que realiza. Sin embargo, el caso contrario no es cierto: a partir de la función que caracteriza a un objeto en su interacción con el entorno, no nos es posible definir su estructura. De aquí se deduce que la descripción estructural

aporta más información (y caracteriza más completamente) que la funcional. Un ejemplo de ello se puede encontrar en la electrónica, donde es relativamente sencillo (y desde luego posible) calcular la función de transferencia de un cuadripolo si conocemos los componentes que contiene, y cómo están conectados unos con otros. Pero el caso contrario, esto es, descubrir la estructura interna del cuadripolo a partir de su función de transferencia, es imposible: hay infinitas combinaciones de elementos electrónicos que dan el mismo comportamiento de "caja negra". Para poder decidir cuál de todas ellas es la que se corresponde con una función dada, necesitamos saber a priori algo sobre la estructura interna del cuadripolo.

En informática es fácil observar lo mismo. Dado el código completo de un programa (su estructura), podemos predecir acertadamente su comportamiento (su descripción funcional). Pero un mismo comportamiento de cara al usuario puede esconder programas muy diferentes.

5. El sistema desde el punto de vista estructural

La aproximación estructural a los sistemas intenta descubrir su organización interna, qué elementos lo componen, cómo se interrelacionan, qué dependencias hay entre ellos, qué estructuras se pueden distinguir dentro de un mismo sistema, etc. Es evidente que cada sistema tiene sus propias características que lo hacen único, pero hay una serie de parámetros, por llamarlos de alguna forma, que son comunes a todos los sistemas y que pueden ser muy útiles a la hora de estudiarlos.

5.1 Límites de un sistema

Todo sistema, sea abierto o cerrado, tiene unos límites que lo definen y permiten identificarlo y diferenciarlo de otros sistemas. En los sistemas cerrados estos límites aparecen muy claramente pero en los sistemas abiertos estos límites son generalmente muy difusos y

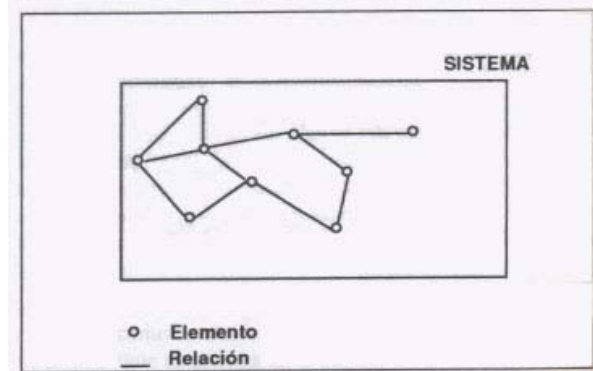


Fig.2 Esquema de un sistema visto desde el punto de vista estructural.

difíciles de establecer. Aún en este último caso, para estudiar un sistema se empieza por delimitarlo, separando lo que es el sistema y lo que va a ser su entorno.

Un ejemplo muy útil son las ciudades. Una ciudad se puede estudiar como un sistema abierto pero ¿cómo se establecen los límites?. Una forma de hacerlo puede ser atenerse a las divisiones municipales, otra establecer una zona de influencia de tantos kilómetros. Cualquier decisión que se tome implica, por ejemplo, que no se van a considerar las ciudades dormitorio que rodean a la ciudad que nos interesa (a pesar de que son un producto directo de ella e incluso una parte de la misma), o que las zonas rurales que rodeen a la ciudad se consideraran como entorno (cuando, como sucede a menudo, son también zonas residenciales de gente que trabaja en esa ciudad), ¿hasta dónde llega la zona de influencia de una gran capital?, ¿hasta qué punto se puede diferenciar entre entorno y zonas que están en los límites de la ciudad?.

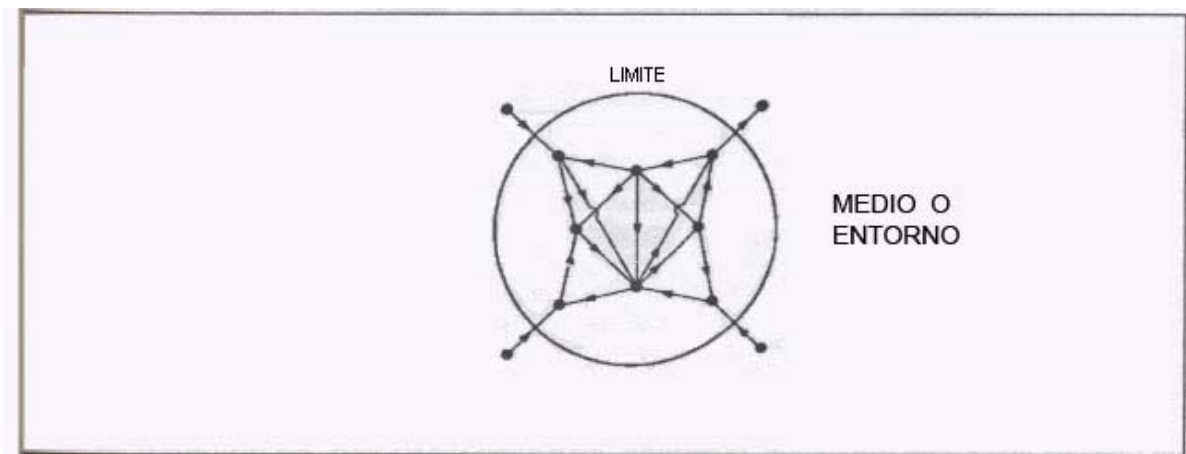


Fig.3 Límites de un sistema [Aracil, 1986, p. 44]

Establecer los límites del sistema es una situación que se presenta muy a menudo en la ciencia y en la ingeniería, cuando se habla de centrar, acotar, definir o clarificar un problema se está intentando definir cuáles son sus límites.

5.2 Elementos

Una vez establecidos los límites del sistema ya se pueden identificar los elementos que lo componen. De ahí la importancia de seleccionar unos límites adecuados, sin una definición apropiada será imposible identificar los componentes del sistema. El ejemplo de la ciudad es muy claro, una vez delimitada sólo se considerarán elementos de ella lo que esté dentro de esos límites, lo demás será parte de su entorno. Por otro lado, al nombrar el sistema, es decir, identificar sus características relevantes que nos interesan, restringimos los elementos que se van a considerar.

Si estudiamos la ciudad desde el punto de vista medioambiental los elementos que nos interesan son focos de polución, zonas verdes, vertederos, depuradoras, etc., y hay que establecer unos límites definidos (qué tramo de un río se considera elemento de la ciudad, influencia de montañas que están cerca, fenómenos como la lluvia ácida, que puede originarse a muchos kilómetros de la ciudad que se estudia, etc.). Si lo que nos interesa es la ciudad desde el punto de vista organizativo, los elementos relevantes serán las juntas de vecinos y de distrito, los barrios, las concejalías, el ayuntamiento, etc., en cuanto a los límites hay que estudiar cómo se considera el gobierno civil, el gobierno autonómico, y todas las estructuras organizativas que no son exclusivas de la ciudad.



Fig.4 Elementos que conforman un sistema [Rosnay, 1977, p. 41]

La identificación de los elementos es, como se ve, función de cómo definimos el sistema y los límites que le imponemos. Hay que tener en cuenta, además, el nivel de resolución con que queremos trabajar, no es lo mismo estudiar la organización limitándonos a las estructuras municipales que llegar hasta las juntas de vecinos. El nivel de resolución elegido nos va a indicar hasta donde tenemos que considerar el sistema. Pueden existir varios niveles de resolución, en cuyo caso, los elementos se transforman a su vez en subsistemas sobre los que de nuevo se definen unos límites, unos componentes y un nivel de resolución. La ciudad desde el punto de vista organizativo presenta muchos niveles de resolución, la familia, los grupos de vecinos, los distritos o los barrios, y muchos subsistemas como la escuela (organizan la educación), las oficinas y las fábricas (organizan el trabajo), los hospitales (organizan la sanidad), la policía (organizan la seguridad), etc.

5.3 Interacciones

La condición para que los elementos considerados formen un sistema es que interactúen entre ellos con un objetivo común (ver las definiciones de sistemas). Las interacciones no tienen por qué ser permanentes, pueden producirse sólo en momentos determinados, sólo ocasionalmente, de forma aleatoria, y tampoco tienen por qué ser lineales ni

separables. Una gran parte de la complejidad de los sistemas proviene de las interacciones entre sus elementos.

Las interacciones se pueden dar entre niveles muy diferentes y entre todos los subsistemas, por ello es muy importante elegir bien el nivel de resolución y cómo se agrupan los elementos para formar subsistemas. Los gases se pueden estudiar evitando mucha de su complejidad disminuyendo el nivel de resolución, interesándonos sólo por propiedades del todo (presión, volumen, temperatura), si aumentamos el nivel de resolución nos encontramos con un número enorme de interacciones entre moléculas que nos impide hacer cualquier previsión formal sobre el comportamiento del gas. En una ciudad no es buena idea agrupar a los habitantes por orden alfabético, pues este agrupamiento no tiene nada que ver con las interacciones entre ellos, los grupos que se hacen se definen en función de unas interacciones comunes: la familia, los universitarios, los menores de 18 años, los estudiantes de ingeniería, los habitantes de un barrio, los socios de un determinado club, etc.

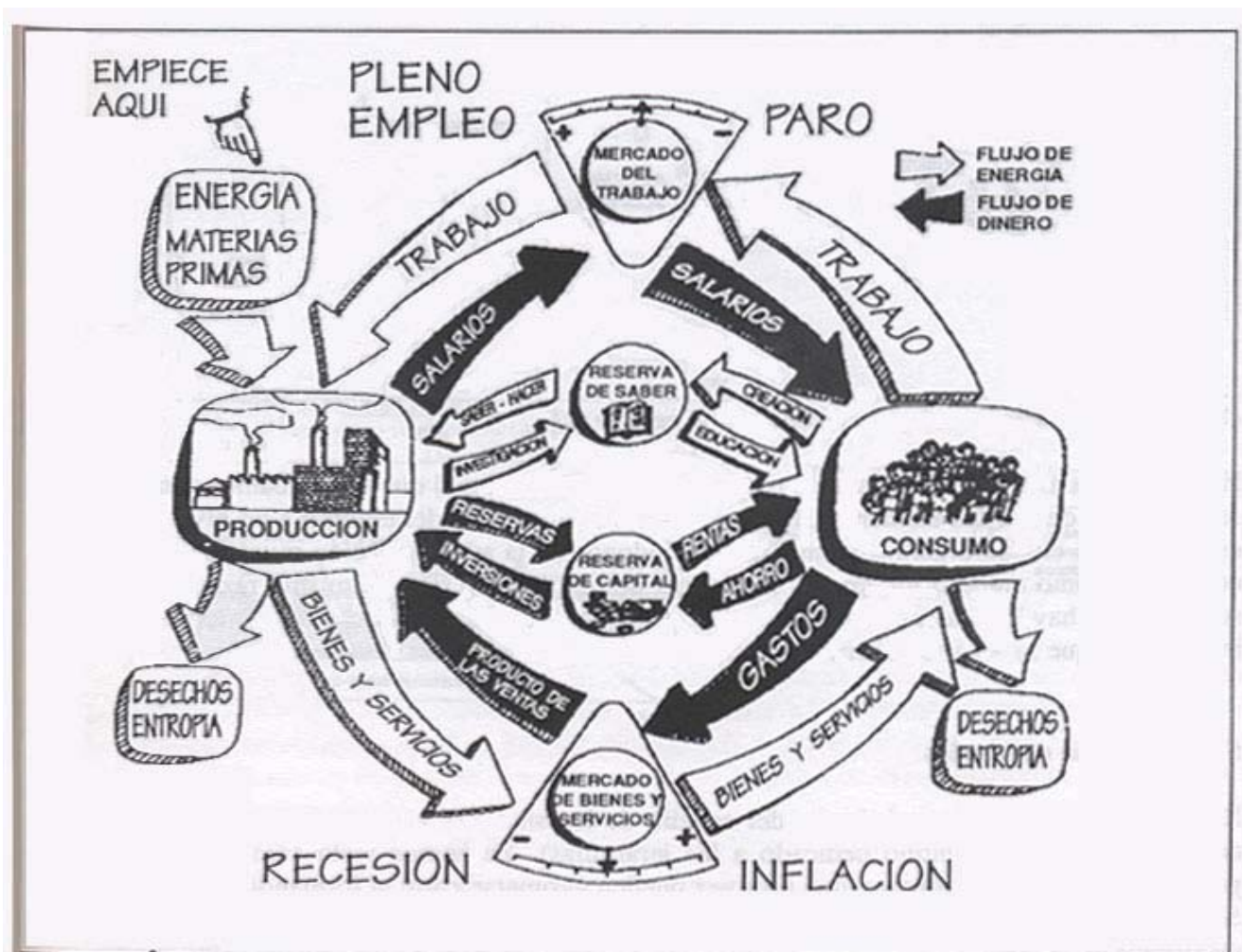


Fig.5 Interacciones que componen un sistema [Rosnay, 1977, p. 28]

Una correcta elección de los elementos que se consideran en el sistema, junto con el nivel de resolución más adecuado puede ayudar mucho a reducir la complejidad derivada de las interacciones entre los elementos.

5.4 Entorno

Los sistemas abiertos no quedan completamente caracterizados si no se tiene en cuenta el entorno. De forma intuitiva, el entorno de un sistema es todo aquello que lo rodea y condiciona en su comportamiento y evolución. Existe una relación bidireccional entre el sistema y el entorno dado que interactúan entre ellos, el sistema modificando el entorno y el entorno, al obligar al sistema a adaptarse a él.

La importancia del entorno es considerable en todos los sistemas, pero es fundamental para poder entender el funcionamiento de sistemas evolutivos, autoorganizados y adaptativos. El entorno de una ciudad es muy amplio: el área física en la que está, la región, la provincia, la nación, etc., y no se la puede estudiar a fondo como sistema si no se considera debidamente el entorno en el que ésta está situada.

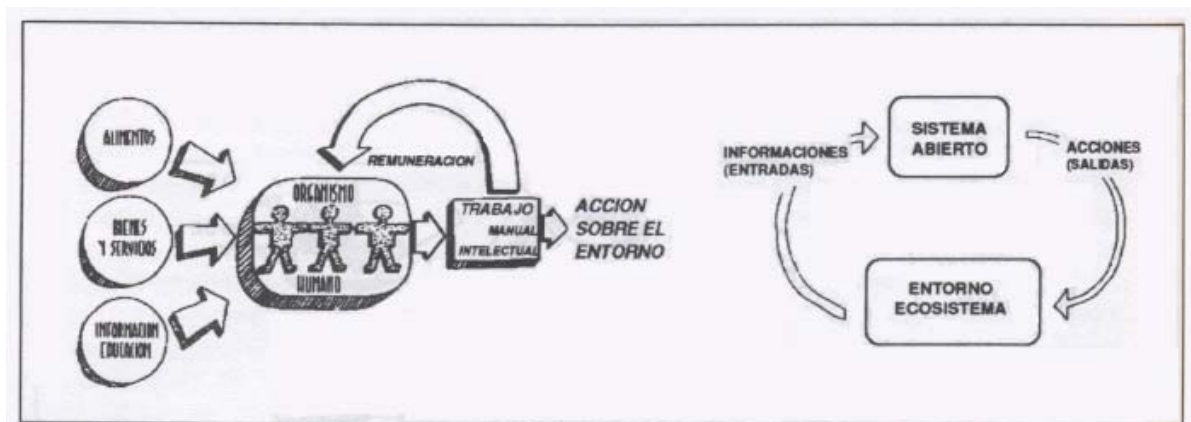


Fig.6 Entorno de diferentes sistemas [Rosnay, 1977, pp. 82 y 52]

Esto nos lleva a un punto importante respecto al entorno. Al igual que trabajábamos con un nivel de resolución al definir los elementos, hay que limitar la influencia del entorno a un nivel relevante, si estudiamos la ciudad organizativamente quedándonos en la administración municipal, no podemos considerar como entorno los grupos familiares del extrarradio. Por la misma razón, al considerar subsistemas, hay que identificar el entorno relevante de cada uno de ellos, entorno con el que interactúa y que será parte del entorno total del sistema.

5.5 Jerarquía de niveles

Este aspecto es fundamental dentro del estudio de los sistemas y, en general, en el estudio de la complejidad (ver el capítulo dedicado a las jerarquías). Ya hemos visto cómo los elementos se pueden agrupar en subsistemas, que a su vez pueden agruparse entre sí formando otros subsistemas. Se forma así una jerarquía de niveles en el sistema, cada uno de los cuales se puede estudiar como un sistema en sí mismo.

Cada nivel de la jerarquía tiene un nivel de resolución, se relaciona con un determinado entorno y se caracteriza por un tipo determinado de interacciones. Generalmente, cada nivel de una jerarquía lleva asociado, además, un lenguaje propio que le caracteriza y no se puede entender en otros niveles. El ordenador, tal y como se muestra en la figura 7, es un ejemplo muy claro de jerarquía: puede verse como un sistema genérico, pero dentro de él podemos distinguir diversos niveles con subsistemas característicos (ver como referencia el capítulo dedicado al tratamiento de la complejidad donde se estudia a fondo este tema). El nivel más bajo puede ser el de circuito, después el de puertas lógicas, por encima de éste el nivel de registros, el de microprogramas, el lenguaje máquina, los lenguajes estructurados, los programas, etc. En cada uno de estos niveles hay distintos sistemas: circuitos electrónicos, circuitos lógicos, secuenciadores, unidades de proceso, etc., cada uno con unos límites y un entorno definidos y cada uno de ellos con un lenguaje distintivo: la teoría de circuitos, el álgebra de Boole, la teoría de autómatas, el ensamblador, lenguajes de programación avanzados, interfaces, etc.

Las jerarquías ayudan a reducir la complejidad en el estudio de un sistema al permitir separar de una forma ordenada diferentes partes del mismo y situarlas en unos niveles interdependientes. Al mismo tiempo permiten trabajar en diferentes niveles de resolución, aislar partes del sistema global para estudiarlas más a fondo sin entrar en la complejidad del resto del sistema.

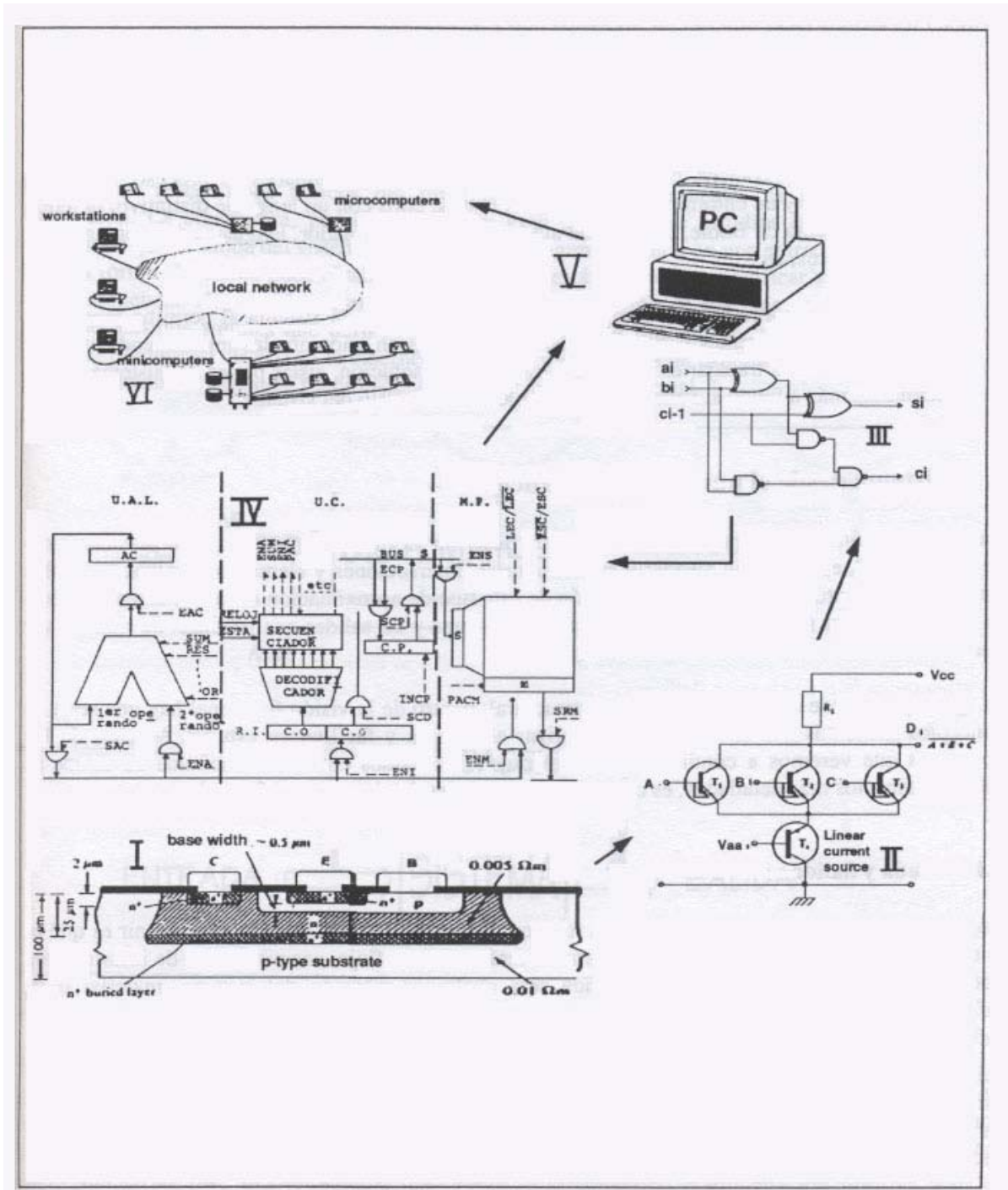


Fig.7 Jerarquía de niveles de un posible sistema

6. El sistema desde el punto de vista funcional

La aproximación funcional a los sistemas intenta describir su funcionamiento con un planteamiento de "caja negra", es decir, sin atender a las estructuras, interacciones y elementos que hacen posible ese funcionamiento. La mejor caracterización de este tipo de aproximación es la que antes veíamos: se trata de estudiar la relación entre las entradas al sistema y las salidas que produce. Se trata de ver qué hace "el sistema".

Al igual que sucede con la aproximación estructural, dentro de la visión funcional hay una serie de conceptos genéricos que sirven para caracterizar al sistema y facilitar su estudio. Muchos de los conceptos que veremos a continuación están muy relacionados con otros capítulos en donde se estudian aspectos más detallados, es conveniente no perder de vista estas referencias.

6.1 Entrada y Salida

Lógicamente, para caracterizar un sistema funcionalmente lo primero que hay que definir es qué es la entrada al sistema y qué la salida. La entrada será cualquier flujo, sea material o de información, que vaya del entorno al sistema, la salida será cualquier reacción del sistema, material o de información, que vaya hacia el entorno. La diferencia que se hace entre flujos materiales y de información es importante pues no siempre se puede evaluar la entrada en términos cuantitativos.

En un circuito electrónico la entrada puede ser una cierta tensión, la salida la corriente que circula por un amperímetro. Pero también puede que la entrada sea una temperatura si el circuito es sensible a este parámetro y la salida no es sólo corriente o tensión sino también calor disipado hacia el exterior. Generalmente no se consideran las entradas o salidas que no son suficientemente grandes o no parecen relevantes, pero no por ello dejen de estar presentes, tómesese como ejemplo las interferencias, una "entrada" al circuito que está siempre presente y puede ser suficientemente importante como para distorsionar la salida. Es importante tener en cuenta estas entradas adicionales a los sistemas pues pueden llegar a ser decisivas en el comportamiento global (ejemplo de ello es el envejecimiento de los componentes que convierte un circuito determinista en caótico, tal y como veíamos en el capítulo de conceptos relacionados con la complejidad).

6.2 Realimentación, positiva y negativa

Uno de los mecanismos básicos del funcionamiento de los sistemas es la realimentación. La cibernética, por ejemplo, basa gran parte de sus estudios en ella. Básicamente consiste en que la salida del sistema se convierte, de alguna manera, en una entrada más del sistema. De esta forma el sistema puede "saber" qué es lo que está haciendo y modificar su comportamiento en consecuencia. Hay muchos ejemplos de realimentación, uno de los más sencillos es el de los servomecanismos simples que definen la próxima salida en función de la entrada y de la salida anterior. El ejemplo clásico en la cibernética son los mecanismos de tiro automático que calculan la nueva posición del cañón en función del objetivo y la posición actual.

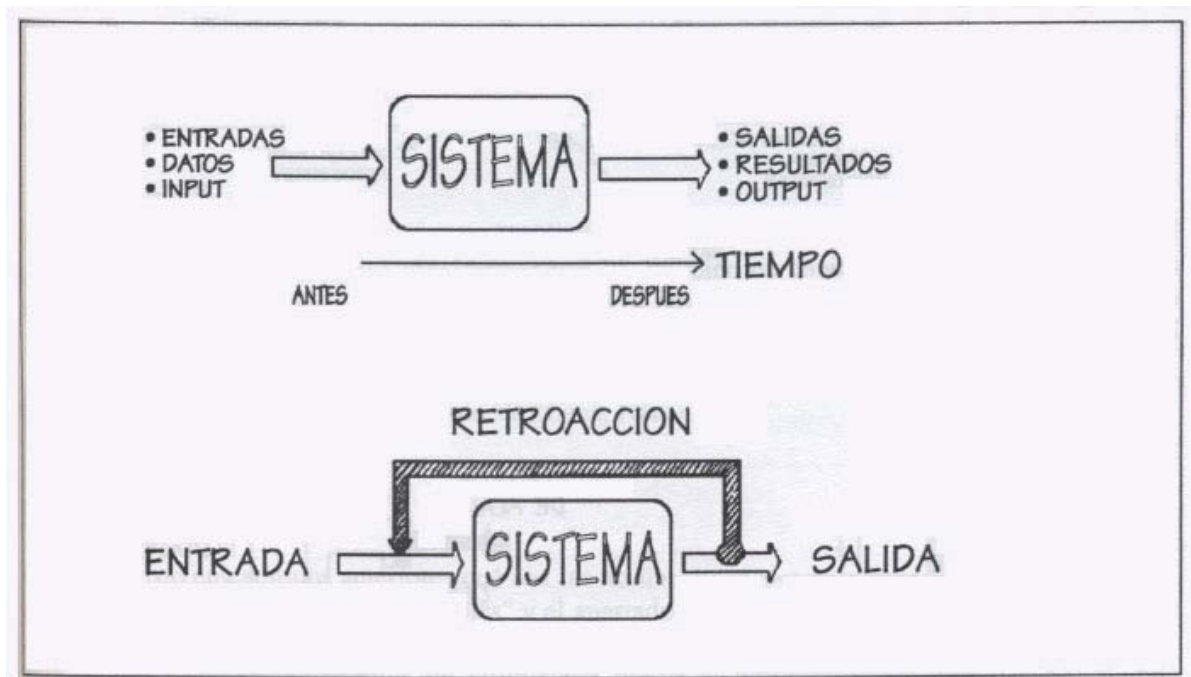


Fig.8 La realimentación como elemento funcional de los sistemas [Rosnay, 1977, p. 89]

Por lo general, la realimentación se hace en forma de algún tipo de información de la salida hacia la entrada y según sea el efecto que produce esta información así será la realimentación. Si la realimentación produce resultados del mismo tipo que los resultados precedentes se trata de una realimentación positiva. Si, por el contrario, los resultados son de signo contrario a los resultados anteriores se trata de una realimentación negativa. Ejemplos de realimentación positiva son la relación entre la población y el número de nacimientos (más población \Rightarrow más nacimientos \Rightarrow más población ...), o la fisión nuclear (más fisión \Rightarrow más partículas \Rightarrow más colisiones \Rightarrow más fisión ...). Ejemplos de realimentación negativa son la población y la tasa de natalidad (más población \Rightarrow más mortalidad \Rightarrow menos población ...), o los termostatos (menos temperatura \Rightarrow más calefacción \Rightarrow más temperatura ...).

La realimentación positiva tiene efectos acumulativos y conduce a inestabilidades o a bloqueos. Cuando existe una realimentación positiva un aumento de la salida provoca que la salida siga aumentando indefinidamente, si se produce una disminución, la salida disminuirá continuamente hasta hacerse nula. El ejemplo de la población ilustra muy bien este punto.



Fig.9 Ejemplo de realimentación positiva [Rosnay, 1977, p. 90]

La realimentación negativa produce una convergencia hacia un valor determinado, por ello se aparece en los sistemas que tiene un objetivo. El comportamiento aparentemente inteligente de los dispositivos con realimentación negativa fue lo que llamó la atención a los primeros estudiosos de la cibernética (ver el capítulo dedicado a la historia del enfoque sistémico).



Fig.10 Ejemplo de realimentación negativa [Rosnay, 1977, p. 91]

En un sistema suelen aparecer varios bucles de realimentación, positiva y negativa, generalmente interrelacionados entre sí lo que a veces dificulta identificarlos como tales. Es muy común encontrar un bucle negativo asociado a uno positivo.

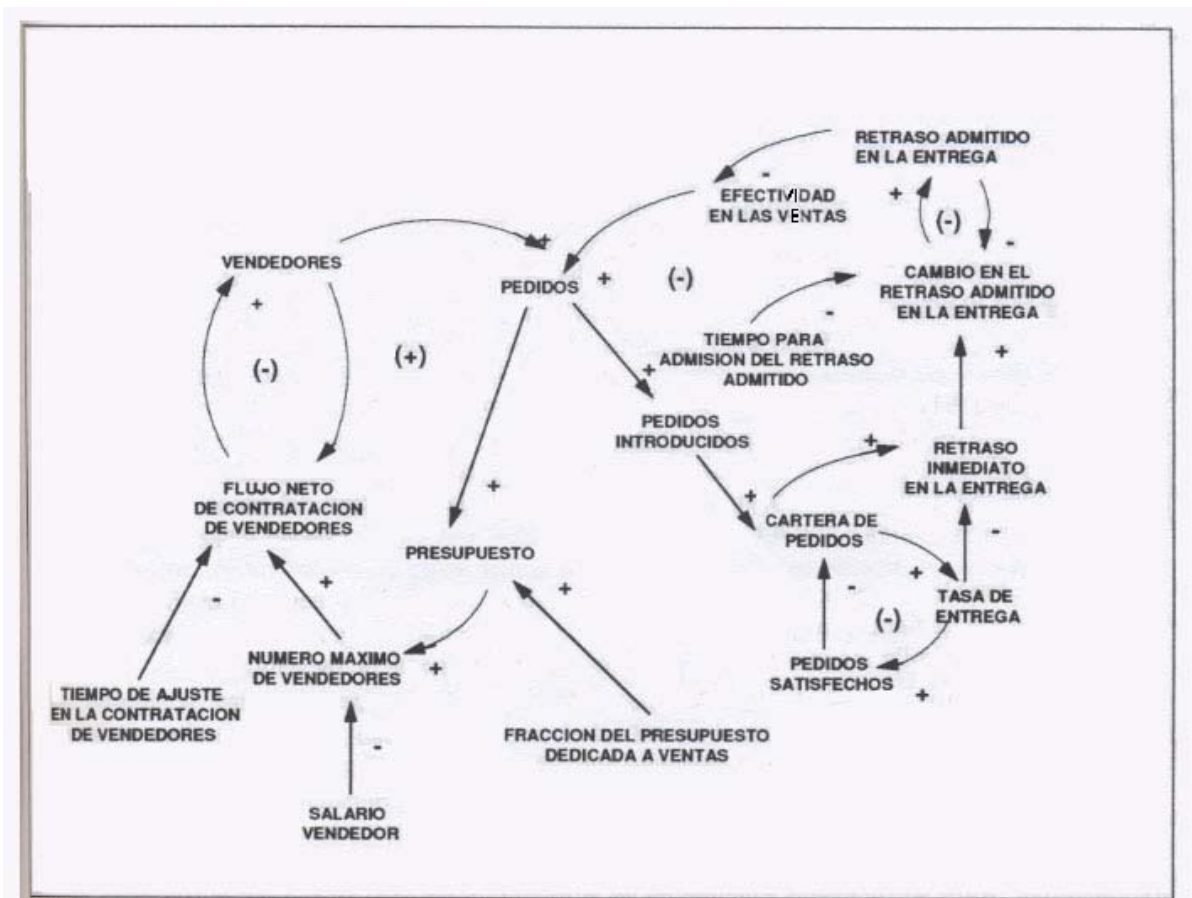


Fig.11 Sistema con varios bucles de realimentación [Aracil, 1986, p. 124]

6.3 No linealidades

Ya hemos visto en capítulos anteriores qué son las no linealidades y su influencia en la complejidad de los sistemas (ver "Marcos Conceptuales" y el apartado dedicado al caos en "Conceptos asociados a la complejidad"). Desde el punto de vista funcional, la presencia de no linealidades es decisiva pues significa que existen puntos de bifurcación donde el comportamiento del sistema cambia cualitativamente.

En un sistema lineal, un aumento de la entrada conduce a un aumento de la salida, en un sistema no lineal un aumento en la entrada puede conducir a un estado totalmente nuevo. Las no linealidades pueden aparecer en un momento cualquiera de la vida del sistema, como sucede en los circuitos electrónicos por envejecimiento de los componentes, y también pueden estar presentes desde el origen del sistema pero no aparecer sino sólo bajo ciertas condiciones que rara vez se dan. Por ello es difícil predecir el comportamiento de sistemas donde esto puede suceder.

El estudio de las no linealidades es difícil y aún lo es más tratar con ellas. La ciencia del caos ha proporcionado algunas ideas más sobre su naturaleza y efectos pero todavía faltan herramientas que permitan entenderlas y manejarlas mejor.

6.4 Equilibrio y estabilidad

La noción que tenemos de estabilidad suele estar cerca de lo que se entiende por sistema estático. Sin embargo, un sistema estable es aquél que mantiene sus características e identidad a lo largo del tiempo. Los sistemas en equilibrio pueden reaccionar de dos formas ante perturbaciones externas: en los sistemas en los que predomina la realimentación negativa y no hay linealidades, una perturbación alejará el sistema del equilibrio pero éste volverá a él tras un tiempo (conocido como tiempo de relajación), si en el sistema hay no linealidades o predomina la realimentación positiva, las perturbaciones lo alejarán del equilibrio y el propio sistema se alejará aún más de él para entrar en un nuevo modo de equilibrio o desaparecer.

Para que un sistema con no linealidades cambie su comportamiento, las perturbaciones, o la entrada, han de superar un cierto umbral y que se alcance un punto de bifurcación (llamado así porque en él se produce un cambio cualitativo en el comportamiento del sistema). En un sistema donde predomine la realimentación positiva basta la más mínima alteración del punto de equilibrio para que el sistema no vuelva a entrar en equilibrio.

En los sistemas estables, el concepto de estabilidad también es relativo pues está en función del tiempo de relajación que antes mencionábamos. Si las perturbaciones llegan al sistema más rápido de lo que éste puede asimilarlas se entrará en una situación permanente de inestabilidad.

6.5 Adaptación y cambio

Después de lo que decíamos en el apartado anterior se hace difícil pensar en algún sistema que sea estable. Y, sin embargo, existen muchos sistemas que sobreviven a las perturbaciones, la prueba más evidente de ello es que existen. Una célula, un animal, el hombre o las empresas son ejemplos de sistemas supervivientes. Esto no quiere decir que sean inmunes a las perturbaciones, sino que han podido adaptarse a ellas.

La biología nos ofrece ejemplos magníficos de sistemas que se han adaptado a entornos cambiantes (perturbaciones) y han sobrevivido. La evolución de los seres vivos es una cadena de adaptaciones, de cambios en la estructura del sistema para poder adaptar su funcionalidad al

nuevo entorno. Esta peculiaridad es una de las más difíciles de reproducir en los sistemas artificiales.

La viabilidad de cualquier sistema pasa por su capacidad de adaptación y cambio. Los sistemas naturales poseen esta importante cualidad y el estudio de los mecanismos de adaptación es uno de los campos más importantes dentro de los sistemas construidos por el hombre.

6.6 Evolución y emergencia

Directamente relacionados con los dos conceptos anteriores, la evolución y la emergencia son dos de las características fundamentales de la funcionalidad de un sistema. El hecho de que un sistema pueda adaptarse al entorno le permite superar ciertas "agresiones", si además puede cambiar para hacer frente a las nuevas situaciones se dice que el sistema evoluciona. Al igual que antes esta es una característica normal en los sistemas naturales, pero pocas veces se puede hablar de un sistema artificial que evolucione (¿Un programa software en sus diferentes versiones?, ¿un ordenador con sucesivas mejoras?).

En biología hay una discusión ya muy antigua que se puede resumir en la siguiente frase "¿la función crea el órgano o el órgano crea la función?". En ella se encierra el secreto del mecanismo de la evolución: cuando los primeros seres dejaron el medio acuático para arrastrarse por la tierra desarrollaron un aparato locomotor adaptado al nuevo medio, ¿fue por la necesidad de andar por lo que se desarrollaron las patas o una predisposición estructural permitió que desarrollaran esa funcionalidad? No vamos a entrar a discutir esta cuestión pero sí nos interesa destacar un aspecto de la misma: la evolución implica la aparición de unas características nuevas cualitativamente diferentes, esto es lo que se denomina emergencia.

La emergencia no se presenta únicamente en la evolución sino que es una cualidad intrínseca de los sistemas. "El todo es más que la suma de las partes" indica que hay algo que no es directamente deducible de la unión de todos los componentes del sistema, esas propiedades que aparecen con el todo son propiedades emergentes.

6.7 Simulación

Para completar esta primera aproximación al estudio funcional de los sistemas es obligado detenernos en la simulación, dado que es una de las herramientas más importantes para estudiar el comportamiento de sistemas. Existen, además, dos conceptos relacionados con la simulación que conviene mencionar brevemente: la construcción de modelos y el análisis de

sistemas.

El análisis de sistemas consiste en definir los límites del sistema que se va a modelar, identificar los elementos más importantes y sus interacciones y el entorno de cada uno de ellos, agrupándolos jerárquicamente. Una vez efectuado este análisis se pasa a la modelización, a construir un modelo que refleje los datos obtenidos a través del análisis de sistemas. La simulación es el estudio del comportamiento del sistema a través de la observación del modelo.

Con la simulación se pueden perseguir objetivos muy diferentes, determinar si las suposiciones sobre el funcionamiento del modelo son válidas (como los modelos utilizados en bioingeniería para el ojo), si los subsistemas identificados se corresponden con una funcionalidad real, efectuar predicciones sobre el comportamiento futuro del sistema, identificar (como la simulación del tiempo atmosférico), estudiar comportamientos erróneos del sistema (como los simuladores utilizados para localizar averías en las líneas telefónicas), etc.

El disponer de un modelo apropiado permite realizar diferentes simulaciones en las que se estudian grupos concretos de variables, se dejan fijos algunos parámetros, se modifica la estructura del sistema, se modifica el peso de las interacciones, etc., lo que permite profundizar el conocimiento que se tiene sobre el sistema.

La simulación es una herramienta muy útil si se utiliza adecuadamente. No se deben confundir nunca los resultados obtenidos en una simulación con los datos que aporta la realidad y siempre se deben tener en cuenta las limitaciones inherentes a la simulación.

7. El sistema, como enfoque global

Hemos visto dos formas de interpretar o estudiar los sistemas, una estructural, atendiendo a su organización y las diferentes partes que lo conforman, y otra funcional, centrada en su comportamiento. Pero estos dos enfoques no se pueden separar radicalmente pues son complementarios. En el estudio de cualquier sistema se puede poner más énfasis en una visión o en otra pero la comprensión total de lo que es el sistema sólo se puede conseguir a través de un enfoque global, construido mediante la adecuada síntesis entre el conocimiento estructural y el conocimiento funcional.

La noción más simple de sistema que podamos pensar ya lleva la idea de generalidad. Considerar un objeto como un sistema es reconocer en él un cuadro de características y una complejidad propia que sólo puede abordarse a través de una interpretación global de ese objeto. El enfoque reduccionista de la visión estructural no nos permite saltar de la

interpretación cuantitativa a una visión cualitativa, pero la interpretación funcional, de forma aislada, tampoco nos proporciona los datos necesarios sobre la correlación entre el comportamiento observado y los mecanismos que lo producen. Si queremos realmente conocer un sistema, o actuar sobre él, o construirlo, necesitamos un estudio funcional en el que observemos, comprendamos o definamos el comportamiento del sistema y necesitamos, también, trasladar ese comportamiento a unos mecanismos estructurales que nos permitan actuar, regular o reproducir el sistema.

En el capítulo sobre la historia del enfoque sistémico se puede encontrar esta idea del sistema como enfoque global más desarrollada y en relación con algunas ciencias en las que se ha aplicado con éxito.

8. Resumen

En este capítulo hemos estudiado con cierto detalle la noción de sistema, presentando en primer lugar una relación amplia y detallada de cómo se puede definir. A pesar de que el enfoque sistémico, como veíamos en un capítulo anterior, intenta destacar los aspectos generales de los sistemas, es difícil separar el sistema de su aplicación inmediata y del campo de estudio donde se utiliza. Para superar esta dificultad hemos recurrido a los trabajos de Klir que proporcionan una idea más clara e independiente del dominio de lo que son los sistemas.

La relación de los sistemas y la complejidad aparece plenamente cuando se consideran sistemas abiertos, es decir, sistemas que interactúan con el entorno, adaptándose a él y modificándolo en virtud de esa interacción. Para estudiar los sistemas hemos distinguido dos enfoques, la visión estructural y la visión funcional.

La visión estructural de los sistemas se centra en su organización, los elementos que lo forman, las interacciones entre ellos, las agrupaciones lógicas que se pueden establecer, los límites del sistema y las posibles jerarquías de subsistemas.

La visión funcional hace hincapié en el comportamiento del sistema, en qué hace. Dentro de ella se estudia la entrada y salida al sistema, la realimentación, el equilibrio, no linealidades, sistemas inestables, la evolución, la emergencia de propiedades nuevas y, como herramienta de trabajo para el estudio de los sistemas, la simulación.

Estos dos enfoques son complementarios y se ha de tener en cuenta a ambos si se pretende llegar a tener una visión global de lo que es el sistema. Este último punto es el que nos sirve de enlace con el capítulo en el que estudiamos la historia del enfoque sistémico, donde

aparecen, con una perspectiva histórica, muchas de las ideas que hemos desarrollado algo más formalmente en este capítulo.

Bibliografía

Dividida en dos partes. En el apartado de Notas bibliográficas se comentarán aquellos trabajos que más profusamente han servido para redactar las páginas anteriores. El apartado de Referencias Bibliográficas contiene todos los trabajos citados.

Nota bibliográficas

Existen muchos libros en los que se tratan a fondo todas las ideas de este capítulo, muchos de ellos los hemos ya citado en otros capítulos ("El Macroscopio", por ejemplo), sin embargo hay un par de referencias de especial interés:

"Sobre un enfoque de la teoría general de sistemas", artículo de Robert A. Orchard, recogido en el libro, editado por Klir, **Tendencias en la teoría general de sistemas** (Alianza Universidad, número 208). En él se recoge, convenientemente resumido, el trabajo de Klir para construir un método formal del estudio de los sistemas. Con un formalismo matemático apreciable, pero no complicado, este artículo es una buena introducción al estudio formal de los sistemas. Para ampliar aún más se puede consultar **An Approach to General Systems Theory**, de Klir, publicado por Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1969.

Introducción a la dinámica de sistemas, de Javier Aracil (Alianza Universidad Textos, número 58, Madrid, tercera edición, 1987), que, aunque centrado en la dinámica de sistemas según las teorías de Forrester, puede proporcionar una idea bastante clara de una clase de aplicaciones de los sistemas y su estudio funcional a través de simulaciones de ordenador.

Existen unos apuntes donde se recogen muchas de las ideas propuestas aquí. **Sistemas, apuntes para el curso de Fundamentos y Función de la Ingeniería**, son unos apuntes realizados por Sáez Vacas para dicha asignatura y publicados por la E.T.S.I.T. (1976, FFI/SIS 76.01).

Referencias bibliográficas

Aracil, J. (1987), **Introducción a la dinámica de sistemas**, Alianza Universidad, num. 58, Madrid, Tercera Edición.

Ashby, W.R. (1956), **An Introduction to Cybernetics**, John Wiley & Sons, Chichester.

- Klir, G.J. (1977) **Tendencias de la Teoría General de Sistemas**, Alianza Universidad, num. 208, Madrid
- Orchard (1977), en **Tendencias de la Teoría General de Sistemas**, editado por G.J. Klir, Alianza Universidad, num. 208, Madrid
- Rosnay, Joël de, (1977) **El Macroscopio**, Editorial AC, Madrid
- Sáez Vacas, F. y Lampaya, D. "Concepcion multinivélica y cuasidescomponible de sistemas complejos. Aplicación a la informática" **V Congreso de Informática y Automática**, Mayo 1982, pp. 281-286.
- Simon, H.A. (1969), **The sciences of the artificial**, MIT Press, Cambridge, Ma.