

COMITÉ DE REDACCIÓN

Presidente

Sr. D. Martín Aleñar Ginard
Teniente General (R) del Ejército de Tierra

Vocales

Sr. D. Eduardo Avanzini Blanco
General de Brigada Ingeniero del Ejército del Aire

Sr. D. Manuel Bautista Pérez
Director General del Instituto Nacional de Meteorología

Sr. D. Carlos Casajús Díaz
Vicealmirante Ingeniero de la Armada

Sr. D. Luis García Pascual
Director de las Escuelas de Ingeniería del ICAI

Sr. D. Ricardo Torró Durán
General de Brigada Ingeniero del Ejército de Tierra

Sr. D. Alberto Sols Rodríguez-Candela
Ingeniero de Sistemas. Isdefe

Sra. Dña. M^a Fernanda Ruiz de Azcárate Varela
Imagen Corporativa. Isdefe



Isdefe

Ingeniería de Sistemas

c/ Edison, 4
28006 Madrid
Teléfono (34-1) 411 50 11
Fax (34-1) 411 47 03
E-mail: monografias@isdefe.es

P.V.P.: 1.000 Ptas.
(IVA incluido)

Otros títulos publicados:

1. Ingeniería de Sistemas. *Benjamin S. Blanchard.*

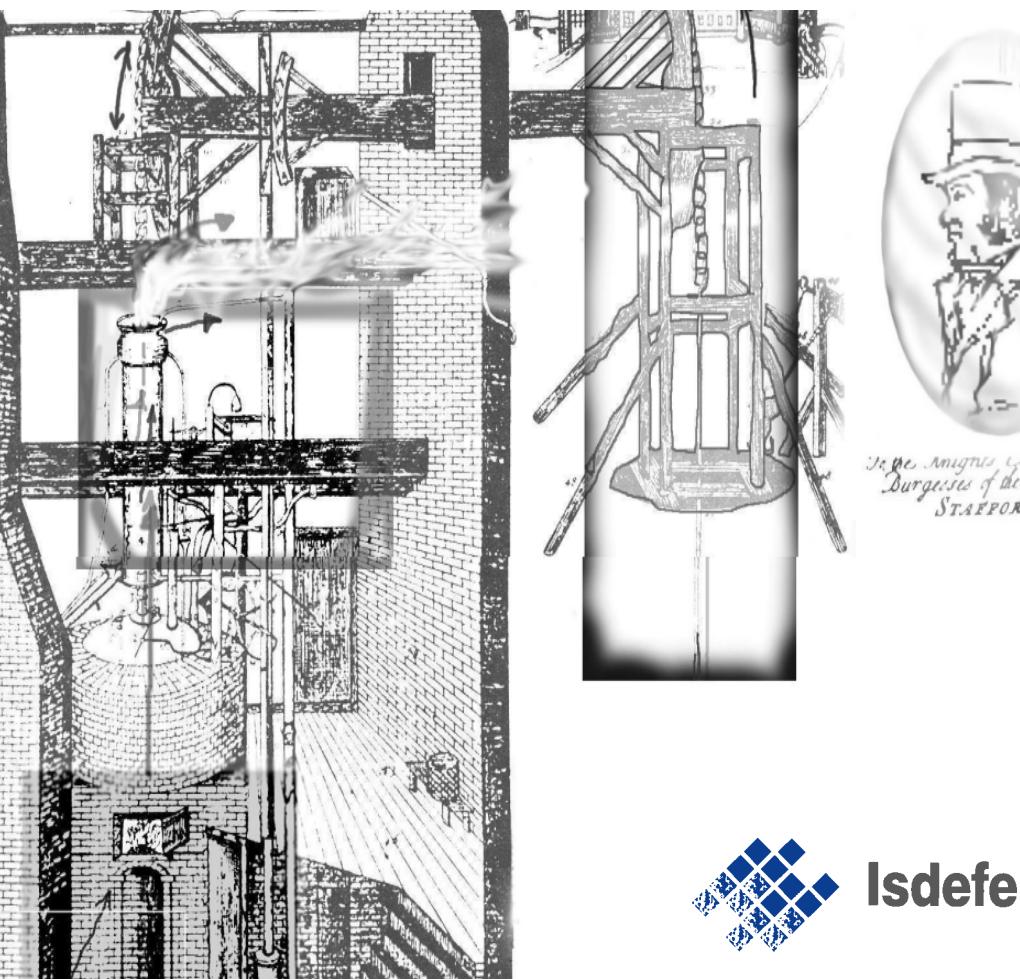
Publicaciones de Ingeniería de Sistemas

2

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

por
Ángel A. Sarabia

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS. Ángel A. Sarabia



2



Ángel A. Sarabia

Ángel A. Sarabia es Doctor en Ciencias Matemáticas por la Universidad Complutense y Profesor Propio Ordinario (Catedrático) de Investigación Operativa y Estadística de la E.T.S. de Ingenieros Industriales (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas. Ha sido Jefe de Departamento, Director de la Escuela y actualmente es Vice-Rector de Relaciones Internacionales de la Universidad.

Ha impartido cursos sobre Teoría, Modelado y Simulación de Sistemas en programas de Doctorado y en el Máster de Logística de la U.P. Comillas, dictado conferencias (curso Máster de la E.O.I. y otros), desarrollado modelos, asesorado a empresas y elaborado textos y apuntes sobre estos campos, donde sus doctorandos desarrollan sus tesis.



ILUSTRACIÓN DE PORTADA
Máquina atmosférica de vapor

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, por fotocopia, por registro o por otros métodos, sin el previo consentimiento por escrito de los titulares del Copyright.

Primera Edición: Febrero - 1995
1.250 ejemplares

© Isdefe
c/ Edison, 4
28006 Madrid.

Diseño:
HB&h Dirección de arte y producción

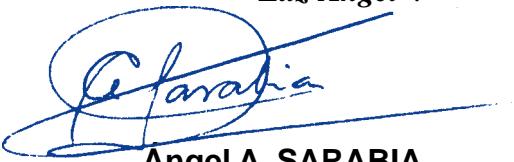
Infografía de portada:
Salvador Vivas

Fotomecánica:
Microprint, S.A.

Impresión:
Gráficas Marte, S.A. (Madrid)

ISBN: 84-68338-01-9
Depósito legal: M -
Printed in Spain - Impreso en España.

*Al subsistema **Luz**, integrado por el operador supremo y el subsistema logístico del sistema “Luz-Ángel”.*



Angel A. SARABIA

MALAVENTURADOS

- los xenófobos y racistas,
- los nostálgicos de los autos de fe y fundamentalistas de todo tipo,
- los aprendices de dictadores y sacerdotes de la intolerancia,
- los egoístas y ególatras,
- los “redentores” no deseados ni deseables,
- los conversos a su propia palabra,
- en general, todos aquellos diosecillos, iluminados por la contemplación de su ombligo que, por ignorancia culpable o por perversión, niegan el valor de la diversidad,

porque renunciando de este modo a percibir la maravilla de la Creación y convirtiéndose en rémoras para la evolución de la Humanidad, de ellos no será el

REINO DE LOS SISTEMAS

ÍNDICE GENERAL

1. LOS SISTEMAS: UNA PERCEPCIÓN DE LA REALIDAD	7
2. LOS LADRONES NO SON GENTE HONESTA Y ADEMÁS NO SABEN NADA DE SISTEMAS	13
3. LOS NIÑOS SÍ ENTIENDEN DE SISTEMAS	19
4. UN POCO DE HISTORIA	25
5. LA MECÁNICA RACIONAL, EL PARADIGMA CARTESIANO	31
6. CREANDO SISTEMAS	35
7. LOS SISTEMAS CERRADOS	45
8. LOS SISTEMAS ABIERTOS	53
9. EL MODELO PRESA-DEPREDADOR: LA HISTORIA DE AMOR Y ODIO DE LOS LOBOS Y LOS CORDEROS	59
10. UNA CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS	69
11. DEL PARADIGMA CARTESIANO AL SISTÉMICO	77
12. EL PARADIGMA SISTÉMICO: LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS	81
13. LOS SISTEMAS DE REPRESENTACIÓN	89
14. EL PROCESO DE MODELIZACIÓN SISTÉMICA	95
15. EL ANÁLISIS SISTÉMICO, LA SIMULACIÓN Y EL DISEÑO	113
16. LA DINÁMICA DE SISTEMAS: UN MÉTODO EFICAZ DE REPRESENTACIÓN	119
17. EL SISTEMA “EMPRESA”	125
18. LA LOGÍSTICA: UNA VISIÓN SISTÉMICA DEL CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO O UN SISTEMA	133
19. HERRAMIENTAS MATEMÁTICAS PARA MODELAR SISTEMAS	139
20. REFLEXIONES FINALES	149
RECORDATORIO FINAL	155
REFERENCIAS	157
BIBLIOGRAFÍA	161
GLOSARIO	165

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

1

Los sistemas: una percepción de la realidad



Me van a permitir que me presente. Supongo que mi nombre vendrá escrito en la portada y en mi trabajo, y cuando me dejan tranquilo, a veces me dedico a reflexionar sobre ciertos temas, que no interesan a casi nadie y de los que extraigo conclusiones incontrovertibles que no sirven para casi nada; en otras palabras, soy matemático.

Algunas de estas conclusiones han sido recogidas en los diversos libros de los que soy autor y debo reconocer que no son un exceso de originalidad, cualidad que parece tengo reservada, si hay que creer a mis alumnos, a los enunciados de los problemas que propongo. Tengo pues cierta práctica en elaborar textos próximos a mis originales estudios universitarios, pero jamás se me había pasado por la cabeza escribir sobre un tema que es para mí apasionante, la Teoría General de Sistemas. Así, que cuando me propusieron la tarea me acometió una mezcla de ilusión y temor; lo primero porque me obligaba a enfrascarme en uno de mis temas preferidos y lo segundo porque, a más de limitarme, creo que con buen criterio, la extensión del trabajo, suponía para mí el reto de concretar una serie de reflexiones que he ido desarrollando, unas basadas en lecturas de especialistas magníficos y otras fruto de mi observación de la realidad, pero que no estoy muy seguro de tenerlas suficientemente maduras. Dicen que los grandes filósofos y teólogos alemanes escriben su obra cuando alcanzan su madurez, poco antes de su jubilación; yo no soy alemán, ni tampoco un gran filósofo, más bien creo que soy un ignorante osado, pero, consciente de este hecho, someto

con toda humildad estas líneas a la consideración del pío lector, en cuya benevolencia deposito toda mi confianza, aceptando de antemano las críticas que me puedan llover.

La más obvia de mis conclusiones es que vivimos en un Universo lleno de objetos, unos físicos, otros lógicos, éstos materiales, aquellos de mas allá pertenecientes al mundo del espíritu o de la razón. Este Universo configura una realidad que no llego a comprender en su totalidad, razón por la cual me veo limitado a intentar entender sólo pequeñas partes del mismo, para luego, en una espectacular pируeta mental, establecer un esquema global de relaciones, interacciones, modelos de evolución y finalidades entre todos los objetos de ese Universo, en la medida que los conozco y los percibo.

Desgraciadamente para mí, el volumen y la calidad de mis conocimientos, mis limitaciones personales y mis posibilidades para superarlas y, sobre todo, las peculiaridades de mi personalidad, hacen que la visión que tengo de esa realidad sea sesgada y parcial y, en muchos casos, ni siquiera llego a sentir la percepción de esa globalidad ni de los múltiples lazos que relacionan a las diferentes partes que en ella puedo percibir.

La **Teoría General de Sistemas** (T.G.S.) es la historia de una filosofía y un método para analizar y estudiar la realidad y desarrollar modelos, a partir de los cuales puedo intentar una aproximación paulatina a la percepción de una parte de esa globalidad que es el Universo, configurando un modelo de la misma no aislado del resto al que llamaremos **sistema**. Todos los sistemas concebidos de esta forma por un individuo dan lugar a un modelo del Universo, una cosmovisión cuya clave es la convicción de que cualquier parte de la Creación, por pequeña que sea, que podamos considerar, juega un papel y no puede ser estudiada ni captada su realidad última en un contexto aislado. Su paradigma, es decir, su concreción práctica, es la **Sistémica o Ciencia de los Sistemas**, y su puesta en obra es también un ejercicio de humildad, ya que un buen sistémico ha de

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

partir del reconocimiento de su propia limitación y de la necesidad de colaborar con otros hombres para llegar a captar la realidad en la forma más adecuada para los fines propuestos.

A lo largo de este texto trataré de presentarle una serie de situaciones, cuyo análisis, dependiendo que se emplee o no una perspectiva sistémica, conducirá a diferentes soluciones. Son situaciones sencillas, que no requieren una herramienta matemática complicada, a partir de las cuales trataré de sacar conclusiones generales.

Para alcanzar este objetivo, y durante la parte inicial de la monografía, nos acompañarán dos “sistemas”, resultado de sendos modelos que yo he hecho de dos “objetos” de mi pequeño entorno en los que me he estado fijando desde hace ya unos años. Se los voy a presentar: se trata de Apolodoro Pérez y Blancanieves Gómez, vecinos de Madrid y algo más que amigos. Los conozco desde que eran niños; luego seguí, con la discreción debida, las vicisitudes de su noviazgo que, dentro de poco, acabará en boda.

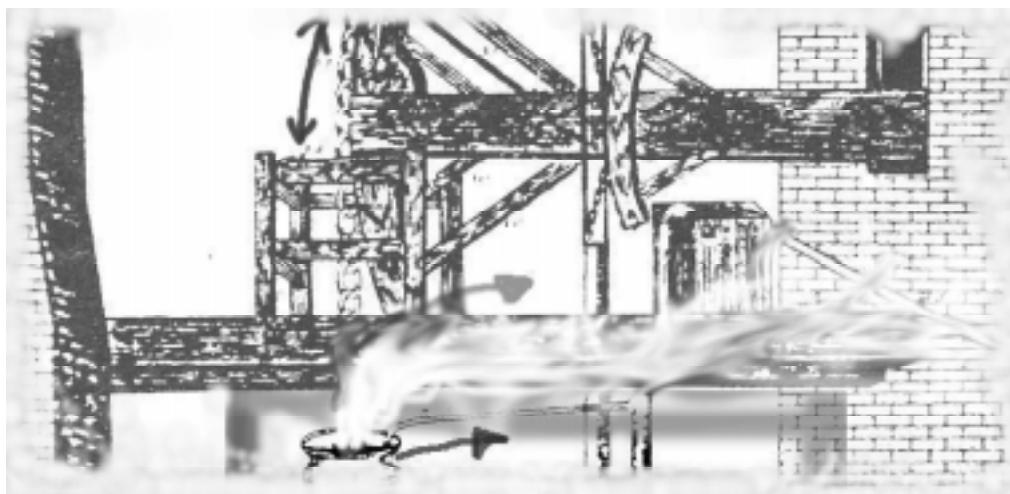
Sus familias son vecinas mías y, aunque no soy lo que se dice un amigo íntimo ni conozco a fondo sus intimidades, como impenitente fisgón que soy, he observado sus entradas y salidas de puertas para afuera y tengo una idea, creo que bastante aproximada, de las personas que las constituyen, de como se llevan, como han ido cambiando y cuales son sus proyectos. En definitiva, he creado un modelo de ambas familias, concibiéndolas como sendos **sistemas**, bien definidos y diferenciados de su **entorno** de vecinos, con el que se relacionan, realizando ciertas **actividades, evolucionando**, de acuerdo con una **estructura y un esquema de relaciones**, hacia unos **objetivos y fines**, sumergidos en otros sistemas más amplios y conteniendo a su vez a otros subsistemas. La boda de Apolodoro y Blancanieves supone un acontecimiento que introducirá cambios importantes en ambas familias y creará un nuevo objeto, una nueva familia, en ese Universo, produciéndose así en el mismo un conjunto

de **mutaciones** o, de acuerdo con la terminología de R. Thom, que no quiero utilizar en esta sección para evitar interpretaciones equívocas, **catástrofes**.

Quisiera, con la lectura de esta monografía, introducirle en esa vía de abordar la comprensión de cualquier objeto o fenómeno, que pueda percibir, ya sea en su entorno físico ya gracias a su capacidad de abstracción y/o conceptualización, desde una perspectiva globalista. Es una metodología que, aplicada con honestidad intelectual, le permitirá al mismo tiempo conocer y percibir mejor a otro "sistema" que suele ser para cada persona el más difícil de percibir y comprender: uno mismo.

2

**Los ladrones no son
gente honesta y
además no saben
nada de sistemas**



En su proyecto de matrimonio Apolodoro y Blancanieves habían incluído la adquisición de un piso, a fin de marcar claramente la separación física con su entorno y no ser confundidos con un gas perfecto. Para ello se inscribieron en una cooperativa, cuyos directivos, expertos en lo que algunos inadecuadamente llaman ¿ingeniería financiera?, aplicaron a rajatabla aquello de que la caridad bien entendida empieza por uno mismo y, cuando nuestra pareja y otras más quisieron darse cuenta, el piso estaba en el cielo y los mangantes de mayor calibre en el Caribe disfrutando del goloso pelotazo.

La poderosa, rápida y eficaz mano de la justicia se puso en marcha y logró detener a dos secretarios del primo segundo del asesor técnico del ordenanza de la cooperativa que, salvo por el volumen de sus rapiñas, eran tan golfos como sus superiores.

Aunque en los tiempos actuales parece que los valores éticos están un poco degradados, hasta los sinvergüenzas más conspicuos y notorios convienen en que los ladrones no son gente honesta ni leal. Ello explica la actitud de los dos ratas de nuestra pequeña historia ante el interrogatorio al que por separado les sometió la policía con el fin de obtener información y pruebas concluyentes para acusarlos.

Cada uno de los dos rateros puede callarse durante el interrogatorio o confesar el delito cargando toda la responsabilidad

Los ladrones no son gente honesta y además no saben nada de sistemas

sobre el cómplice. Dependiendo del resultado de los interrogatorios la policía aportará al juez diferentes conjuntos de pruebas ante las que el magistrado impondrá las penas legales que se recogen en la Tabla 1.

En la parte superior (inferior) de cada casilla de esta tabla aparece el número de años con los que el juez castigará al ladrón A (al ladrón B) si los ladrones adoptan las decisiones correspondientes a dicha casilla. Así, si el ladrón A confiesa y B calla, A queda libre y B, sobre el que han recaído todas las culpas, queda condenado a 10 años de cárcel.

A la vista de esta tabla el razonamiento que hace A es el siguiente: Si mi cómplice confiesa yo seré castigado con 5 años si confieso y con 10 si no confieso; por tanto, en este caso me conviene confesar. Por el contrario, si B calla yo quedaré libre si confieso y tendría un año de cárcel si confieso; también bajo esta hipótesis me interesa confesar cargándole las culpas.

		LADRÓN B	
		CONFIESA	CALLA
LADRÓN A	CONFIESA	5 5	0 10
	CALLA	10 0	1 1

Tabla 1. - AÑOS DE CONDENA: LOS AÑOS DE CÁRCEL DE A EN LA PARTE SUPERIOR DE CADA CASILLA; LOS DE B, EN LA INFERIOR -

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

Como la lealtad tampoco es una cualidad de los ladrones, hay numerosos ejemplos de ello que son de dominio público, el ladrón A pone en práctica su conclusión y confiesa. Lo malo es que B razonó de la misma forma, con lo que el juez encontró las pruebas suficientes para enviarles a la prisión durante cinco años, mientras que si ambos hubieran callado el juez solo hubiera encontrado pruebas circunstanciales y les hubiera condenado a solo un año, lo que como todos sabemos es lo mismo que dejarles en la calle.

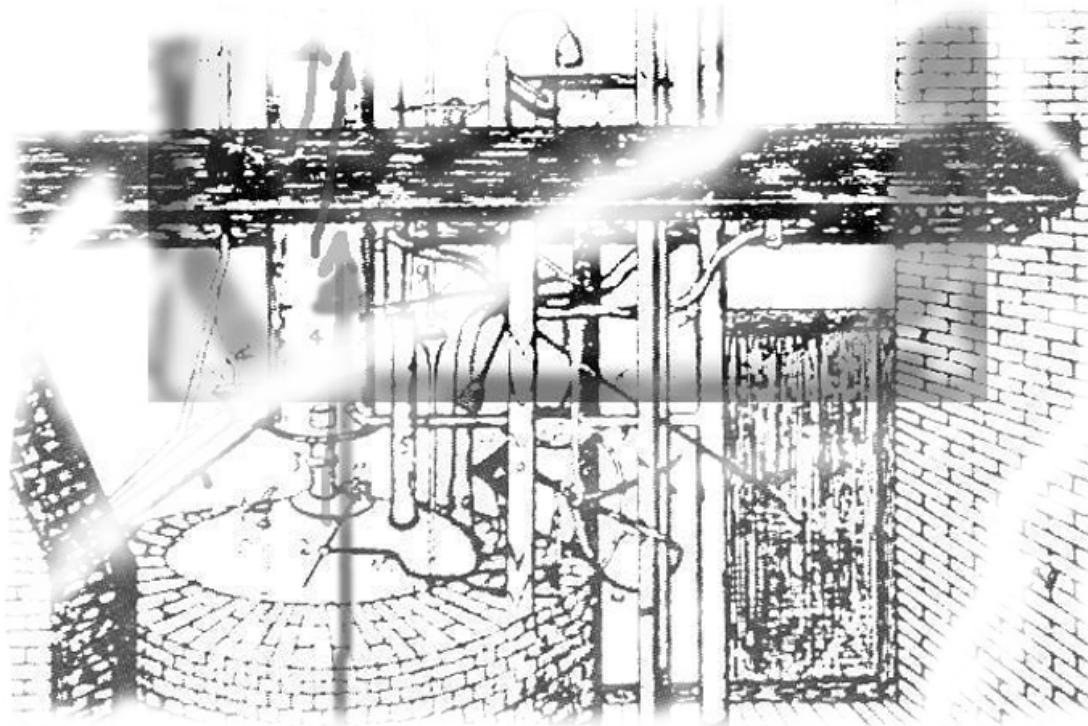
El egoísmo, y el que esta serie de monografías aún no había visto la luz, impidieron que cada ladrón optimizara la situación de forma global (perspectiva sistémica) haciéndolo tan sólo desde su propio ángulo parcial (visión infrasistémica o del “sálvese el que pueda”), sin tener para nada en cuenta la interrelación existente entre ellos. Cada uno se vió a sí mismo como un sistema aislado y no llegaron a entender que sólo eran subsistemas de un sistema más amplio que era la pareja que ellos mismos formaban.

Esta situación no es puramente académica. Es muy frecuente en las organizaciones (grandes sistemas) encontrar situaciones en las que el deseo de cada responsable (lo que más adelante llamaremos operador supremo) de un área o departamento (un subsistema de la organización) de presentar buenos resultados generaría un cataclismo si no hubiera un responsable máximo, operador supremo de la organización, que marcará los objetivos últimos de la misma a los que todas las secciones deberán orientar su actividad. Son de todos conocidos los problemas que en una cadena de producción suelen surgir entre los responsables de compras, el gerente de almacenes y el responsable de finanzas, cada uno de ellos tendiendo en principio a cuidar de su propio huerto, y como se hace necesaria la intervención de la dirección para conseguir un equilibrio beneficioso para la empresa.

E. Goldratt, en su famoso libro “La Meta” [1], describe una buena cantidad de situaciones de esta naturaleza.

3

Los niños sí entienden de sistemas



Afortunadamente en este mundo no todos son ladrones ni del todo egoístas. Lo que voy a describir a continuación es el resultado de un experimento que realicé hace ya bastantes años en el Departamento de Estadística e Investigación Operativa de la que es hoy Facultad de Ciencias Matemáticas de la Universidad Complutense. Es necesario advertir que las cantidades monetarias que se manejaron en aquella época posiblemente no sean suficientes para motivar a los niños de hoy a participar en una experiencia semejante. El hecho de no haber alcanzado los goces de la paternidad me impide por otro lado dar consejos sobre este asunto.

Los protagonistas de la experiencia fueron, ¿porqué no?, Blancanieves y Apolodoro, de ocho y diez años respectivamente en aquel entonces. A lo largo del experimento ambos tenían que elegir sucesiva, simultánea e independientemente uno del otro, entre una ficha roja y otra azul. Como resultado de sus elecciones recibían como premio las cantidades en pesetas que se reflejan en la Tabla 2. En la parte superior de cada una de sus casillas se indica la cantidad percibida por Apolodoro y en la inferior la ganada por Blancanieves.

Al comienzo de la experiencia los niños elegían las fichas con la idea de sacar su máximo provecho individual: la ficha azul era seleccionada en proporción significativamente mayor que la roja, con lo que sus ganancias respectivas se reducían a una peseta por cada elección de ficha. A medida que los niños iban captando el sentido del juego, partiendo del incremento constante de información que sus su-

cesivas elecciones les proporcionaban, alcanzaban un acuerdo tácito, no verbalizado, por el que ambos pasaban a cooperar eligiendo la ficha roja con la que obtenían cuatro pesetas por elección. Lo curioso del caso es que este principio de organización de la pareja era respetado durante una serie de jugadas, pero en un momento dado uno de los niños “traicionaba” el acuerdo y a partir de ese momento, y tras acusarse mutuamente, de nuevo el caos parecía gobernar sus criterios de selección hasta que tras una serie de elecciones de nuevo volvían a ese equilibrio que en general parecía satisfacerles más. De forma intuitiva pasaban a concebirse como un todo interrelacionado, en el que a partir de su actividad de jugadores tenían el objetivo común de ganar la mayor cantidad de dinero.

Tampoco el comportamiento de los niños en el juego anterior es inusual. En toda organización, no importa cual sea su naturaleza, cuyo funcionamiento sea considerado como bueno cara a unos objetivos, podemos observar este comportamiento cooperativo. Ello vale

		BLANCANIEVES ELIGE	
		ROJO	AZUL
APOLODORO ELIGE	ROJO	4 4	0 5
	AZUL	5 0	1 1

Tabla 2. - GANANCIAS DE LOS JUGADORES: LAS DE BLANCANIEVES EN LA PARTE INFERIOR DE CADA CASILLA; EN LA PARTE SUPERIOR LAS DE APOLODORO -

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

desde un sistema del tamaño de un Estado moderno democrático (de los de verdad), pasando por una empresa, un equipo de fútbol o baloncesto (si usted es aficionado a este último deporte sabe lo bien que se valora a los jugadores que proporcionan asistencias), una unidad familiar o dos jugadores de tenis jugando por parejas.

En todos estos sistemas se observa como cada subsistema se “sacrifica” por los demás, recibiendo a cambio las ventajas inherentes a pertenecer a un sistema de superior jerarquía, ventajas de las que carece cada miembro en particular, y que en conjunto denominaremos con el término de **sinergia**.

Así, un estado democrático se define como aquel en el que cada individuo sacrifica su interés propio a los fines de su comunidad, que no son otros que los de cada uno de sus ciudadanos. Lo mismo puede decirse de una bien organizada unidad familiar: todos los que formamos parte de alguna de ellas sabemos por dulces (o amargas) experiencias lo agradable o (triste) que puede ser cada momento según que cada miembro mire para los demás (o para sí mismo).

En la Figura 1 tiene usted un pequeño y bien conocido dibujo que muestra como también los animales, ¡y de qué modo!, están imbuidos de la visión sistémica (en su caso el sistema es la especie).

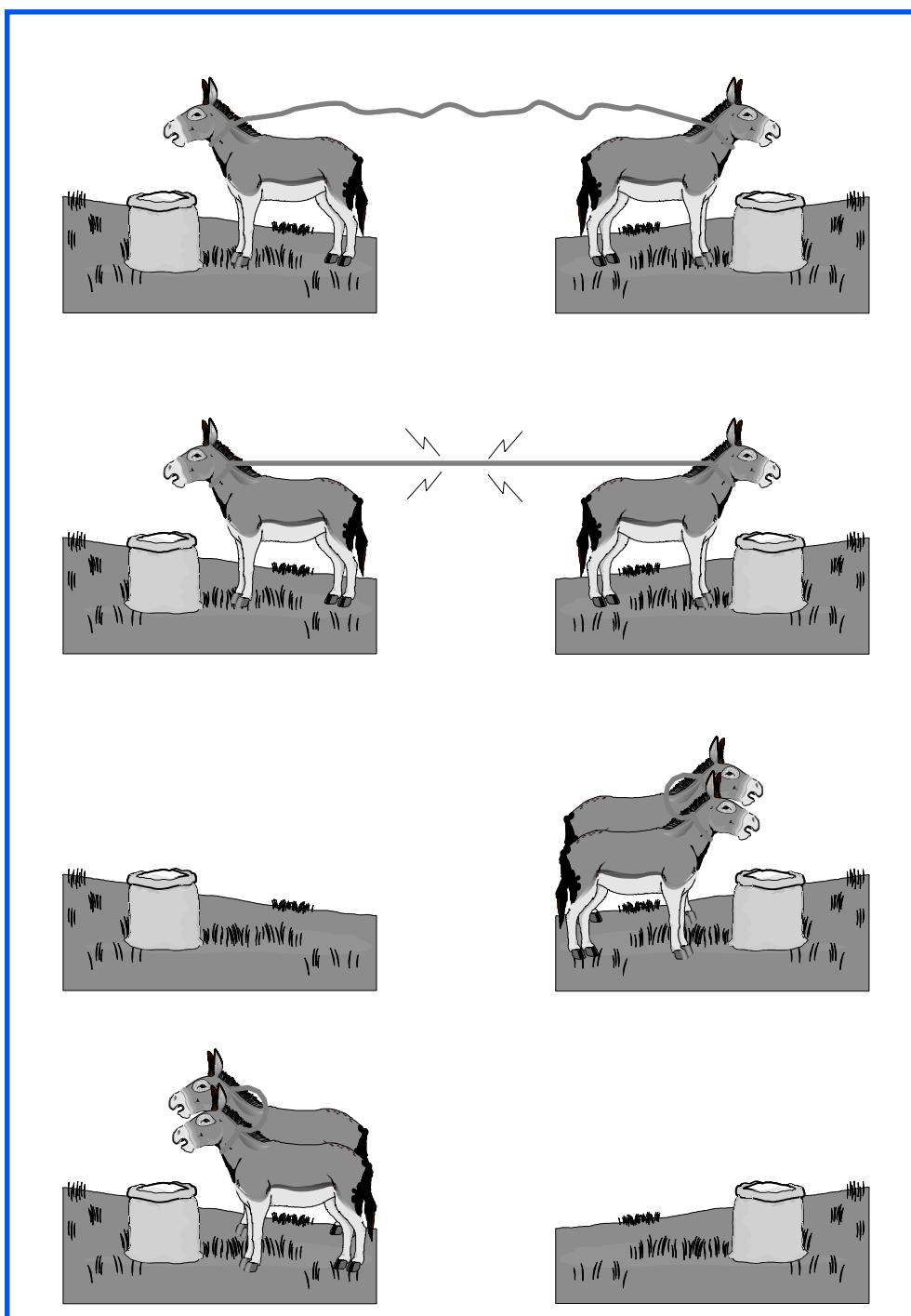
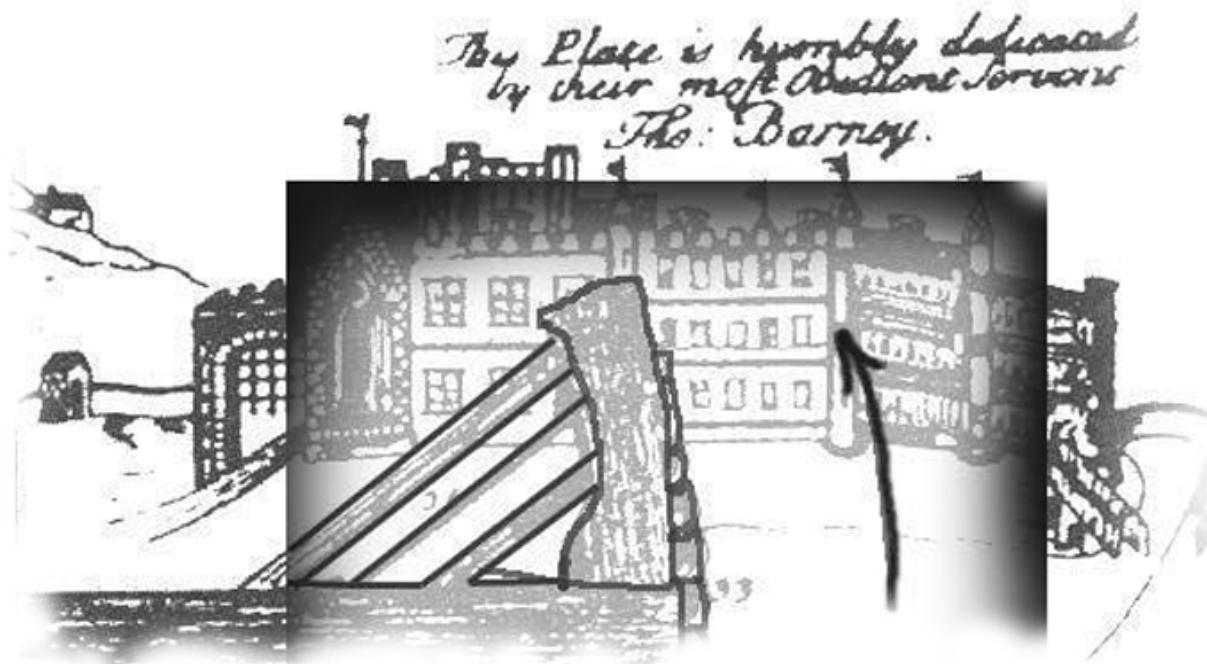


Figura 1. - LOS BURRITOS SISTÉMICOS -

4

Un poco de historia hasta el Renacimiento



Desde que el hombre aparece sobre la tierra su objetivo, no siempre explícito, consiste en dominar ese Universo, para lo cual debe en primer lugar comprenderlo. Esa comprensión se ve limitada por la propia capacidad del hombre y de sus medios, de forma que todo objeto, toda parte del Universo que somete a su observación y estudio es asimilada por él creando una imagen o modelo del objeto, del entorno y de la relación entre ambos. Es decir, creando un **sistema** y, como es claro que, pese a la televisión, cada hombre tiene una forma particular de percibir la realidad, podemos decir que **los sistemas no existen en la naturaleza, sólo existen en la mente y en el espíritu del que los crea.**

¿Le parece que la frase anterior en negrita es tan solo una típica frase redonda? En primer lugar, si ha creído que soy el autor de tan lapidaria afirmación le doy las gracias por el alto concepto que se está formando de mí, pero se equivoca, ya que su autoría corresponde a Claude Bernard, un ilustre médico y pensador francés del siglo XIX, y en segundo lugar me dispongo a combatir su incredulidad pidiéndole que se ponga el disfraz de sumiso ciudadano y siga mis instrucciones al pie de la letra. En la página siguiente (¡no mire todavía!) hay un objeto, un dibujo, que usted va a observar cuando yo se lo indique y va a identificar. Mire **ahora** y diga qué es lo que ve.

Aunque hay personas que hacen las identificaciones más insospechadas, la mayoría observa bien a una anciana, bien el perfil de una hermosa joven ataviada según la moda de comienzos del



Figura 2. - "MI MUJER Y MI SUEGRA" -

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

siglo XX: el ojo, la nariz y la boca de la primera son la oreja, la mandíbula y la gargantilla de la segunda. Este dibujo, cuyo autor es un dibujante inglés de comienzos de este siglo, ha aparecido en múltiples textos y artículos para ilustrar la conexión entre las palabras modelo y sistema.

Con el sistema que usted acaba de crear al analizar este objeto, y con todos los que haya podido crear y creará al analizar otros objetos, usted, al igual que cualquier otra persona, no puede pretender introducir un orden en ese Universo a partir de los sistemas creados, sino más bien estructurar su propia mente, a fin de dar un sentido a las cosas y a la vida.

En este orden de cosas es notable observar como el avance tecnológico no implica esa visión global del Universo que propugna la Teoría General de Sistemas.

La antropología y la historia nos enseñan que los pueblos más primitivos, por muy rudimentaria que fuera la tecnología que utilizaban, tenían una visión global del Universo, en el que ellos jugaban un cierto papel, que en muchos casos era el de víctimas de fuerzas desconocidas, pero siempre activo y dotado de finalidad.

Las diferentes concepciones sobre el Hombre y el Universo desarrolladas por los filósofos griegos, con independencia de la escuela que fundaran o a la que pertenecieran, tienen en común una perspectiva integradora y globalista, que integraba en un todo los hombres, el universo físico y las ideas. Las grandes religiones monoteístas y los humanismos que, nacidos algunos de ellos hace ya mas de tres mil años, han tenido una mayor influencia en la evolución del hombre y de la sociedad, se caracterizan también por esta visión global, de la que participaba toda la sociedad. Todo tenía un sentido, todo se explicaba, aunque ahora estamos en condiciones de saber que muchas de las explicaciones eran incorrectas. Desde la perspectiva de la Teoría General de Sistemas, la Edad Media no es la edad oscura por anonomasia.

Es notable que en nuestros tiempos sólo hayamos sido capaces de matizar estas concepciones cósmicas tan antiguas, y en algunos casos, lo que no es poco, llevar a la práctica algunos de sus más nobles planteamientos. En una reflexión personal, aunque supongo que no muy original, percibo que en la base de todos estos planteamientos pre-renacentistas subyace en todo caso un profundo pensamiento filosófico y, lo que para un profesor de una Escuela de Ingeniería es preocupante, muy poca tecnología. Quizás haya un punto de esperanza en que, si bien a una época "filosófico-científica" ha seguido una época "tecnológica", que es la que nos corresponde vivir ahora, da la impresión de que en nuestros tiempos se está produciendo una rebelión de los pequeños y hastiados subsistemas que somos cada uno de los seres humanos, contra el actual sistema de relaciones sociales, demasiado apoyado en factores reduccionistas y en exceso tecnológicos y tecnocráticos, que a muchos nos parece está ahogando y destruyendo otros sistemas de valores más próximos a la naturaleza humana. Esta reacción parece conducir a un atisbo de una más razonable integración entre humanismo, ciencia, tecnología y naturaleza.

5

La Mecánica Racional, el paradigma cartesiano



La concepción globalista de la antigüedad, que someramente hemos descrito en el epígrafe anterior, entra en crisis a mediados del siglo XV y estalla con la aparición en 1637 del “Discurso del Método”, de R. Descartes. Las pautas del pensamiento cartesiano, que han marcado el pensamiento científico occidental, se pueden concretar en cuatro preceptos que configuran la metodología cartesiana para el estudio de cualquier objeto físico o abstracto. Estos cuatro preceptos son :

1º - Precepto de evidencia

No aceptar nada como cierto a menos que se le reconozca evidentemente como tal.

2º - Precepto reduccionista

Dividir cada problema analizado en tantas partes como se pueda y sean necesarias para su comprensión y resolución.

3º - Precepto causalista

Comenzar el estudio de todo fenómeno por los objetos más simples y fáciles de conocer, y ascender poco a poco en la escala de dificultad estudiando objetos más complejos, suponiendo un orden incluso en aquellos objetos que no se preceden de forma natural.

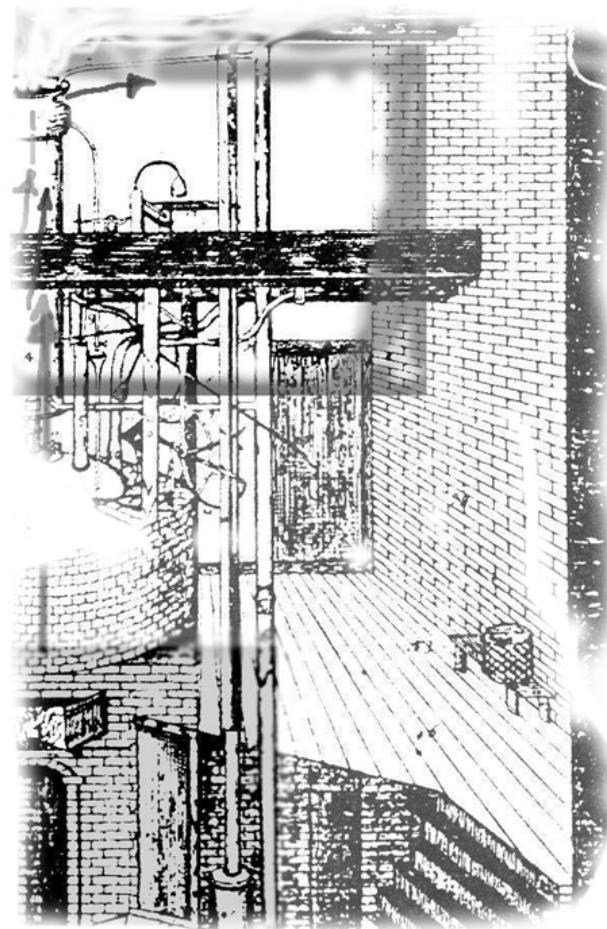
4º - Precepto de exhaustividad

Hacer una enumeración tan completa y una revisión tan general de los componentes de un fenómeno como sea posible, de forma que se esté completamente seguro de no olvidar ninguno.

El paradigma científico de esta forma de pensamiento es la llamada **Mecánica Racional**, y los avances que la Ciencia y la Humanidad le deben son espectaculares y conocidos por todos. El principio de causalidad, de importancia capital en el discurso cartesiano, implica que la estructura es la causa, la condición necesaria y suficiente de la función realizada por el objeto, de tal forma que el **determinismo** gobierna el Universo y la evolución observada es, en cierta forma, **reversible** si se dispone de los medios técnicos para conseguirlo.

6

Creando sistemas



LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

Vamos a detenernos un poco en nuestro breve repaso por la historia de los sistemas y volvamos a nuestros un poco olvidados amigos. Apolodoro es ya estudiante de Biología y Blancanieves ha comenzado los estudios de Ciencias Empresariales.

Apolodoro está muy interesado en la forma en que crecen las poblaciones de conejos, entre otras cosas porque tiene un coto de caza donde hay muchos de estos roedores. Para ello ha comenzado a estudiar en el laboratorio el crecimiento de una población de conejos para los cuales no hay problema de alimentos, al menos durante el período del estudio, pues hay subvención de una fundación. Inicialmente hay un número **C(0)** de conejos, todos de la misma edad, y que se aparean en instantes controlados por Apolodoro. Este observa que tras cada parto “colectivo” el número de conejos se incrementa respecto al número previo en una proporción **r**. Con ayuda de Pitágoras, apodo de un amigo estudiante de Matemáticas, ha establecido que, si **C(n)** es el número de conejos después de **n** apareamientos, se cumple

$$C(n) = C(n-1) + r C(n-1) = (1+r) C(n-1) \quad (6.1)$$

y, como a su vez y por la misma razón, $C(n-1) = (1+r) C(n-2)$, se tiene

$$C(n) = (1+r)^2 C(n-2) \quad (6.2)$$

y, en general,

$$C(n) = C(0) (1+r)^n \quad (6.3)$$

El amigo matemático le explica algo sobre tasas de crecimiento y el tipo de relaciones y fórmulas matemáticas que son de esperar en estos casos. Apolodoro no se entera de gran cosa y, alegre como unas castañuelas tras el hallazgo que le ha permitido modelizar matemáticamente un sistema natural, como el constituido por los conejos de su laboratorio, va al encuentro de su moza a la que invita a tomar una cerveza. Mientras Apolodoro cuenta su historia, Blancanieves observa la fórmula (6.3) y manifiesta su sorpresa porque en Biología estudien análisis financiero. Apolodoro piensa que la cerveza ha sentado mal a su novia y no sale de su asombro cuando ésta le explica que la fórmula (6.3) es la que proporciona el valor de un capital inicial $C(0)$ después de n años colocado a un interés compuesto del $r\%$ anual y antes de impuestos.

Apolodoro explica a su vez el sentido de su fórmula y ambos quedan perplejos viendo como un sistema natural, el de los conejos, y uno artificial en el sentido de que es una estructura económica creada por el hombre, el problema financiero, pueden tener un mismo modelo simbólico con un significado diferente para cada uno de los modelizadores.

A Pitágoras no le inquieta la preocupación de sus amigos, pero a cambio analiza la fórmula (6.1) desde la perspectiva de Blancanieves y le plantea el irreal problema del valor del capital inicial cuando el interés compuesto es continuo. En esta situación, si r es la tasa de interés para el período de un año de 365 días, la tasa de interés para un día sería $(r/365)\%$ y, en general, para un intervalo de tiempo muy, muy pequeño, del que el año tuviera m partes, siendo lógicamente muy, muy grande, la tasa de interés sería $(r/m)\%$. Si se quiere saber cual es el capital al cabo de t veces el pequeño intervalo de referencia, la fórmula (6.3) se convierte en

$$C(t) = C(0) (1+r/m)^{mt} \quad (6.4)$$

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

y, como bien saben los lectores que han seguido un curso básico de análisis y me creerán los que no lo hayan hecho, cuando m es muy grande la expresión (6.2) toma el valor

$$C(t) = C(0) e^{rt} \quad (6.5)$$

donde e es uno de los números más importantes de la matemática y vale **2.7182818284.....** y una secuencia infinita de decimales.

Blancanieves le toma el pelo al matemático, pues acaba de crear un modelo de un sistema que ni siquiera es artificial sino que pertenece al plano de las ideas. Apolodoro, en cambio, no se lo toma tan a broma, pues recuerda que en otro experimento sobre la evolución del número de bacterias en un cultivo, el experimentador jefe estableció para dicho número una fórmula similar a la (6.5).

Esta última situación es conocida de antiguo. Se atribuye a Thomas Malthus la primera formulación de la dinámica de las poblaciones, expuesta en 1798 en su “Ensayo sobre el principio de la población”. En él afirmaba que, si no se introducía algún tipo de freno, una población crecía en progresión geométrica. Así, basándose en consideraciones sociales, económicas y culturales, estimaba que la población entonces de los EE.UU. de América se duplicaría cada veinticinco años. No iba desorientado, porque así ocurrió durante los casi cien años siguientes, aunque no exactamente por las razones aducidas por él, sino más bien porque los EE.UU. en aquel entonces eran, debido a los procesos inmigratorios libres, un sistema muy abierto, concepto este que analizaremos en posteriores epígrafes.

No deja de llamar la atención que los argumentos expuestos por Malthus sigan siendo utilizados en la actualidad, haciendo un análisis del problema, por otra parte muy real del crecimiento de la población, demasiado simplista, poco global y nada solidario.

Un modelo de crecimiento como el de los conejos, donde r es constante, es conocido como un **modelo malthusiano**. En estos modelos si $r>0$ la población crece constantemente, si $r=0$ la población es estable y si $r<0$ la población evoluciona hacia su extinción. Pero lo que observamos en la realidad es que toda población de seres vivos está ubicada en un ecosistema, con el que interacciona importando la energía en forma de alimentos que necesita para sobrevivir. Este hecho fue el que motivó que, cincuenta años más tarde de la propuesta de Malthus, Quetelet y Verhulst interpretaran esta circunstancia estableciendo que r es de la forma

$$r(x) = a - bx \quad (6.6)$$

expresión que un siglo después fue generalizada al expresar que r depende tanto del tamaño x de la población como del tiempo t que lleva evolucionando la población. En concreto

$$r(t,x) = a - h(t)x^k \quad (6.7)$$

donde el término que resta puede interpretarse como un freno que se opone al crecimiento, en el que $h(t)$ refleja la influencia del entorno y la potencia de x un término de autorregulación.

En particular, para el modelo inicial de Verhulst, el modelo de crecimiento es

$$x'(t) = ax - bx^2 \quad ; \quad a,b > 0 \quad (6.8)$$

y, siendo $x(0)$ el tamaño inicial de la población y $m=a/b$, la función que satisface la ecuación (6.8) es

$$x(t) = \frac{m x(0)}{x(0) + e^{-at} (m - x(0))} = \frac{1}{c + d e^{-at}} \quad (6.9)$$

donde $x(0)=1/(c + d)$, $c=1/m$ y $c+d > 0$. Las gráficas de estas curvas,

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

llamadas **logísticas**, vienen dadas en las Figuras 3, 4 y 5. En ellas puede verse que el parámetro **m** no es otra cosa que el tamaño límite de la población.

Observemos que (6.8) puede ser expresado también como

$$x'(t) = bx(m-x) \quad (6.10)$$

es decir, que la tasa de crecimiento instantánea es proporcional a la vez al tamaño actual de la población y a lo que le falta a la población para alcanzar el tamaño límite que las condiciones de su habitat le permiten. Tal como puede observarse en la Figura 5, cuando el tamaño inicial es inferior a la mitad del tamaño límite el crecimiento es inicialmente lento, incrementándose la tasa o velocidad de crecimiento hasta el instante $t^* = (1/m) \ln(d/c)$, momento en el que la población alcanza un tamaño igual a la mitad del tamaño máximo y a partir del cual, aunque continúa creciendo, lo hace a un ritmo cada vez más

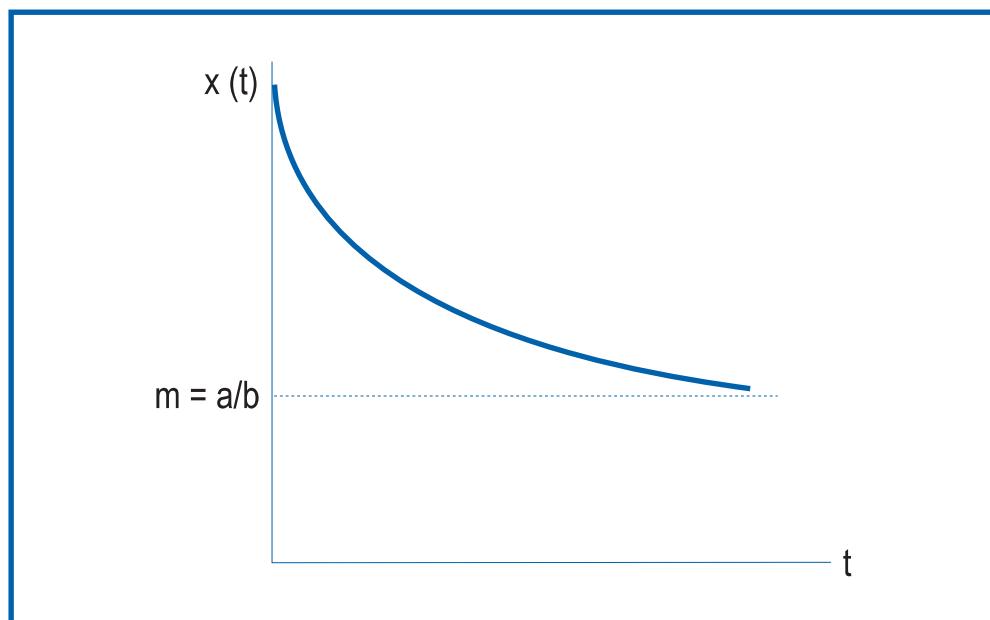


Figura 3. - CURVAS LOGÍSTICAS (I) -

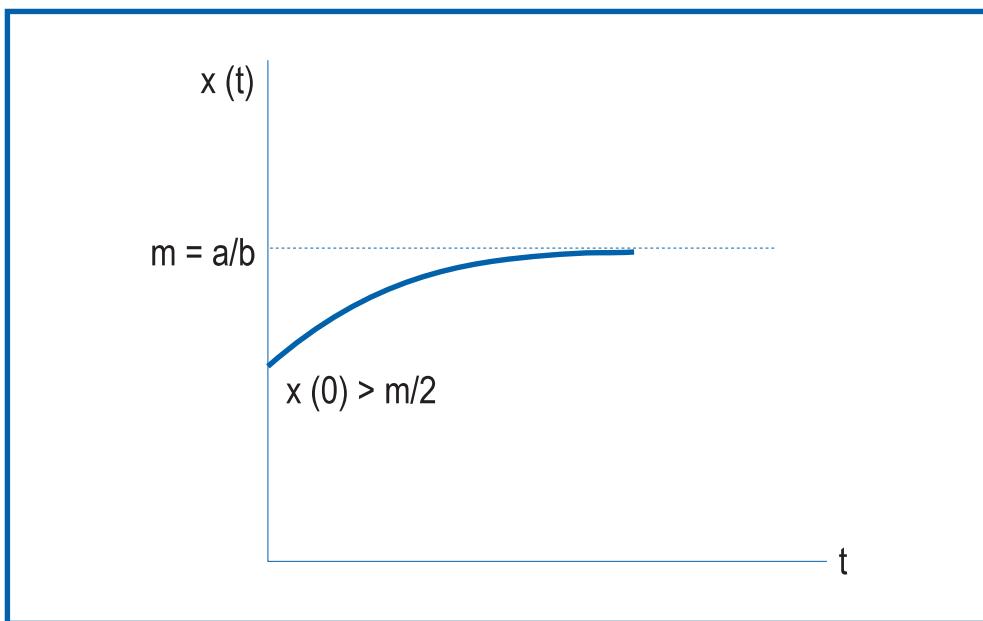


Figura 4. - CURVAS LOGÍSTICAS (II) -

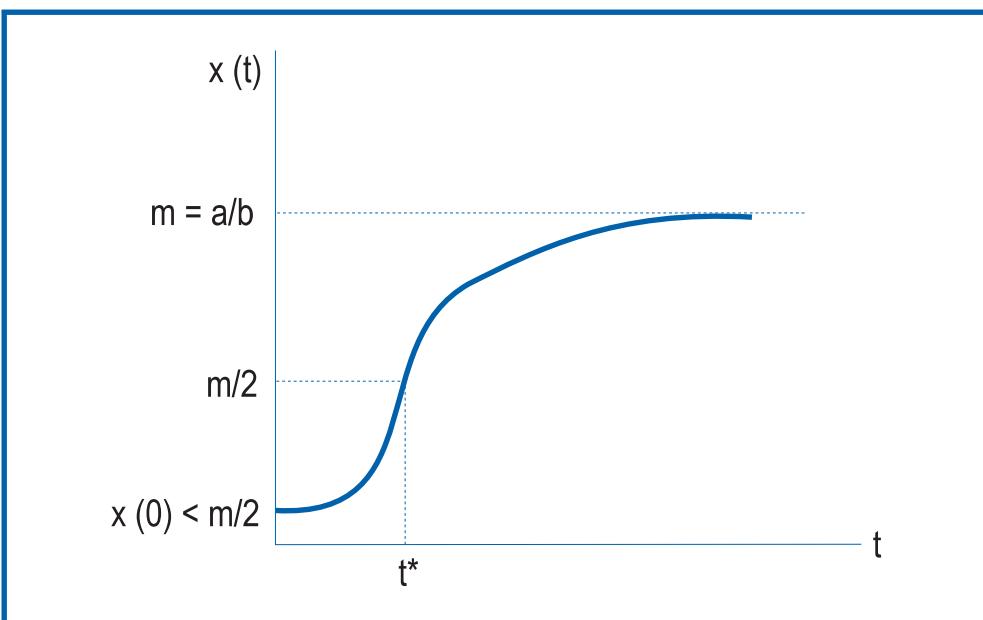


Figura 5. - CURVAS LOGÍSTICAS (III) -

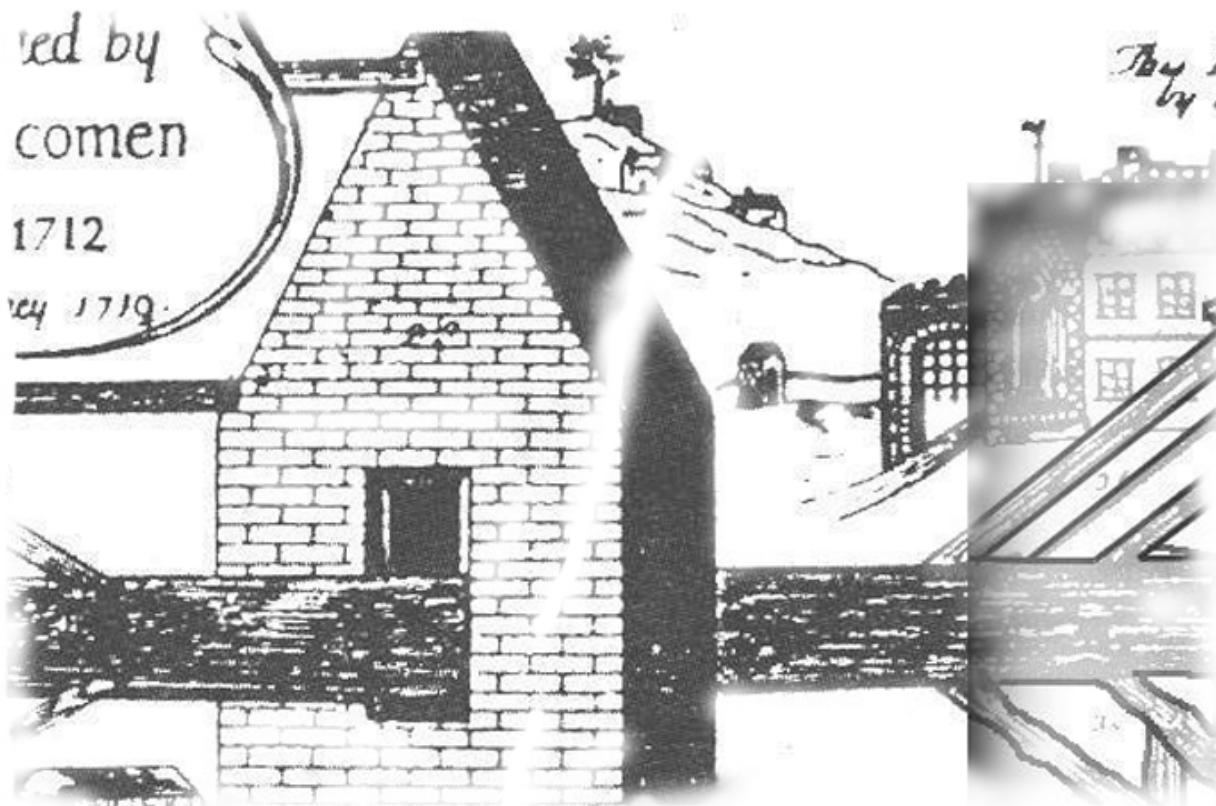
LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

lento. En estos sistemas aparece ya un cierto tipo de regulación del sistema, que adapta su evolución a las restricciones impuestas por el entorno.

Como un nuevo ejemplo de que un mismo modelo puede representar diferentes fenómenos, la ecuación (6.10) nos la encontramos en un estudio de marketing relativo a la velocidad de penetración en el mercado de un producto dado, que inicialmente dispone de una cuota de mercado $x(0)$ y que puede alcanzar una cuota máxima m ; $x'(t)$ es la velocidad o tasa de penetración en el instante t . Por cierto que en mercadotecnia la curva logística típica (Figuras 3, 4 y 5) suele ser más conocida como curva en "S", dada su forma.

7

Los sistemas cerrados



LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

El primer modelo o sistema analizado en el epígrafe anterior del crecimiento de una población y que se concretaba en la fórmula (6.5) y el ligeramente más sofisticado modelo logístico, que presentaba una cierta componente de regulación, son ejemplos de cierto tipo de sistemas denominados **sistemas cerrados**. Este tipo de sistemas parecen sometidos a leyes de evolución intrínsecas y aislados de su entorno, del que están perfectamente diferenciados y con el que no intercambian absolutamente nada a través de la interfase de separación. Es decir, desde el punto de vista de la Teoría General de Sistemas, un sistema cerrado es aquel que no hace nada en ninguna parte y carece de finalidad, es decir, que desde la perspectiva de un observador externo el sistema cerrado, al no intercambiar flujos con su entorno, es un sistema inactivo aunque en su interior puedan ocurrir una serie de sucesos.

Estos sistemas existen tan sólo en el mundo de los modelos pero no hay objetos reales que tengan esas características, aunque para bastantes de ellos, como ocurre con mecanismos cuyo tamaño puede oscilar desde el correspondiente a un reloj hasta el de un sistema solar, pueden ser modelos muy adecuados. Son el objeto de estudio de la Física clásica y, muy en particular, de la mecánica racional. Para los sistemas cerrados modelados según las leyes de la mecánica racional el tiempo es reversible, de forma que es posible, conociendo el estado actual del sistema, saber cual fue su estado en cualquier tiempo anterior.

El siglo XVIII contempla el gran desarrollo de la termodinámica. Los sistemas que son objeto de su estudio parecen que son sistemas

“vivos”, pues se observa en ellos una apariencia de evolución y el tiempo ya no es reversible. Pero es sólo una apariencia: siguen siendo sistemas cerrados. Y es que la caracterización de un sistema como cerrado o no se hace en función de la naturaleza de su evolución, cara a la cual merece la pena detenernos un poco en el famoso segundo principio de la termodinámica de Carnot-Clausius, una ley que explica la evolución continua de un sistema cerrado hacia una total desorganización, en la que desaparecen las estructuras introducidas por las condiciones iniciales, que son substituidas por una homogeneización absoluta.

Esta evolución viene medida por una magnitud, **la entropía**, una función positiva del tiempo que crece continuamente hasta que el sistema alcanza el estado equilibrio y uniformidad. Para comprender este concepto podemos utilizar el siguiente ejemplo (Figura 6) en el que consideramos veinte bolas que inicialmente están situadas en el compartimento A de una caja.

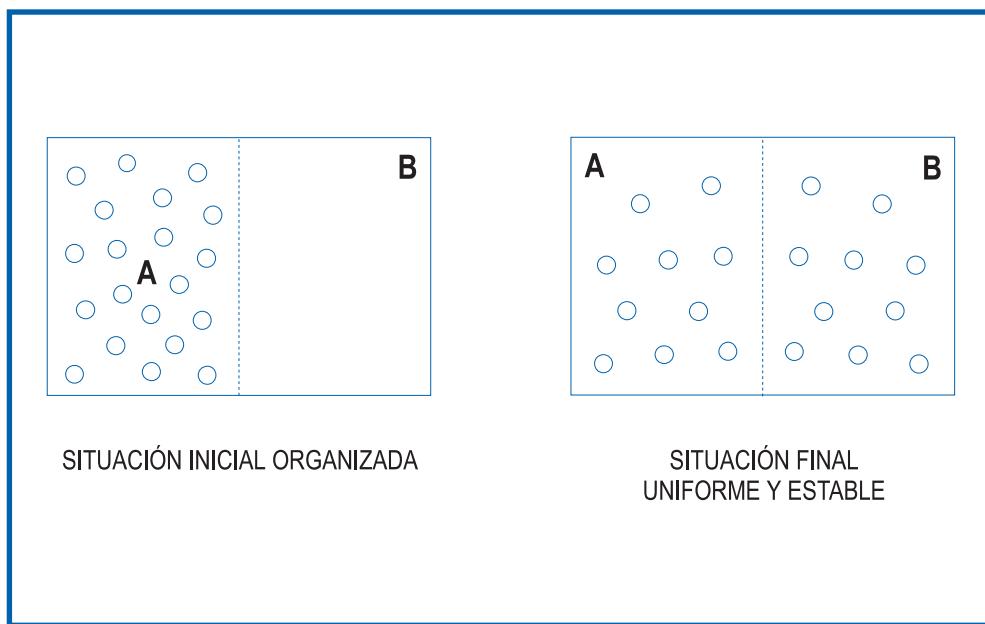


Figura 6.

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

Cada vez que transcurre un minuto cada bola, con independencia de las demás, tiene una probabilidad p de pasar al otro compartimento y una probabilidad $q=1-p$ de quedar en el mismo. Si el sistema no es perturbado exteriormente, un ordenador con un sencillo programa nos simula la evolución del sistema y observa como, con pequeñas fluctuaciones y con independencia del valor de p , el sistema alcanza una situación de equilibrio que corresponde a la equirepartición de las bolas en los dos compartimentos.

La herramienta matemática adecuada para modelar esta situación es conocida como una **cadena de Markov**. Mediante una tal cadena es posible modelar el comportamiento de un sistema que puede en un instante dado estar en un cierto estado entre un posible conjunto de ellos y cambiar eventual y aleatoriamente de estado en ciertos instantes, de forma que la evolución depende sólo del estado en el que se encontraba el sistema pero no de la historia o trayectoria seguida por el sistema hasta alcanzar dicho estado. La situación más simple se da cuando el número posible de estados es finito y los cambios pueden producirse en instantes discretos y distinguibles en el tiempo. En este caso, si en uno de esos instantes discretos de tiempo el sistema se encuentra en el estado h , cuando llegue el instante siguiente pasará a otro de los estados k con probabilidad $p(h,k)$ o permanecerá en el mismo estado con probabilidad $p(h,h)$. El estudio de estas cadenas se realiza con ayuda de la teoría de redes, del álgebra matricial y del cálculo de probabilidades, ya que el estudio se centra en el estudio de la matriz P formada por las probabilidades $p(i,j)$ de transición. Pero en nuestro caso, el sentido común, una muy útil y poco empleada herramienta de análisis, nos proporciona rápidamente una solución.

Para ello nos basaremos en una fórmula elemental de la combinatoria que dice que el número de formas en que n bolas pueden ser distribuidas en dos bloques, de forma que en el primero haya m bolas y en el segundo $n-m$, viene dado por

$$R = \frac{n!}{m! (n - m)!} \quad (7.1)$$

Este resultado, y la simetría del problema, nos permite establecer que el valor máximo de R se alcanza cuando $m=n/2$, supuesto que n es par, o que tiene dos máximos cuando n es impar para $m=(n+1)/2$ y $m=(n-1)/2$. Es decir, el sistema evoluciona hacia el estado para el que R es máxima. Basándose en este tipo de hechos, Boltzman definió la entropía de un estado del sistema por la célebre fórmula

$$E = k \cdot \log R \quad (7.2)$$

en la que k es la llamada constante de Boltzman y el logaritmo puede tomarse en una base cualquiera. Conviene precisar que la entropía, vista como una medida de la riqueza de posibles estados y alternativas que un sistema puede presentar en un momento dado, casi nunca puede ser evaluada, como era el caso del ejemplo previo, por medio de los métodos combinatorios, que son adecuados, y no siempre, para sistemas cuyo número posible de estados es finito. No ocurre tal cosa cuando se analiza la evolución de un sistema formado por un gas o un grupo social. En estos casos otros mecanismos y herramientas matemáticas son necesarios.

Parece pues que la entropía puede ser vista como una medida de probabilidad (¡cuidado!, no es una probabilidad) y que un sistema cerrado evoluciona hacia un estado de máxima probabilidad. Notemos que para definir este estado de equilibrio sólo necesitamos conocer el número total de bolas, es decir, se requiere un menor número de variables de información. Este estado es el de mínima información; de hecho, si alguien nos dice que el sistema se encuentra en el estado de equilibrio, el grado en que nos sorprende la noticia es mucho menor que cuando la información recibida es que todas las bolas se encuentran en uno de los dos compartimentos.

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

Esto conecta de lleno con otra función del estado de un sistema: el concepto, mucho más moderno, de cantidad de información, debido a Shannon. Para un suceso A de probabilidad $P(A)$, Shannon cuantifica la cantidad de información proporcionada por la ocurrencia de dicho suceso por

$$I(A) = - \log P(A) = \log (1/P(A)) \quad (7.3)$$

donde el logaritmo está tomado en base 2 para, de esa forma, la información proporcionada por la ocurrencia de un suceso A de probabilidad 0.5 (salir cara o cruz, nacer una niña o un niño) sea 1. Esta unidad de la cantidad de información recibe el nombre de **bit**.

Puede deducirse de la fórmula (7.3) que cuanto más improbable es un suceso tanto mayor es la información proporcionada por su ocurrencia. Este hecho se manifiesta muy claramente analizando los titulares de la prensa diaria de información general; así, si en una eliminatoria de competición europea el Real Madrid elimina al campeón de Malta el hecho merecerá un breve comentario en las páginas deportivas, ya que en términos periodísticos **no es noticia**, pero si ocurre lo contrario la noticia aparecerá en primera página con grandes titulares al tiempo que las banderas se ponen a media hasta y se reparten sábanas entre la población para enjugar las lágrimas.

Si comparamos los conceptos de información y entropía observamos una primera semejanza formal y una divergencia en el sentido de que mayor entropía implica una mayor probabilidad en el estado mientras que estados más improbables suponen una mayor información. Por ello a veces la información recibe el nombre de **neguentropía** o **entropía negativa**.

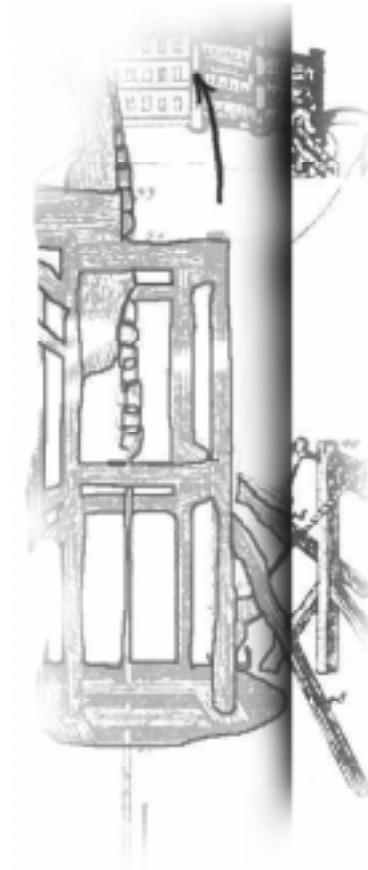
La conclusión práctica es que en un sistema tipo organización que haya alcanzado su estado de máxima entropía la monotonía es la norma y el aburrimiento es generalizado. Esto no es siempre malo y más de una vez hemos soñado con una situación parecida al nirvana,

pero la psicología y la experiencia del día a día nos muestran como el caos es el padre de toda evolución creativa, y el conflicto y la perturbación los motores de la vida social y de la persona. La historia nos recuerda como los grandes imperios, tras haber alcanzado un estado de máxima entropía (desorganización, “reinos de taifa”, pérdida del sistema de valores que los hizo crecer y de la misión abierta hacia sus fronteras y vista como común por todos sus miembros), han desaparecido ante el empuje de sociedades “bárbaras” que, creando el caos en la estructura de la vieja sociedad, dieron lugar a una estructura nueva..... para, a su vez, sufrir un fin similar al de su predecesor.

Por cierto, ¿qué “bárbaros” serán los que nos cambien nuestro actual sistema?

8

Los sistemas abiertos



En el Capítulo 6 analizamos también un modelo de crecimiento de una población, según la fórmula (7.6), en el que se introducía un término que conectaba la población con su entorno. Con este ejemplo introducimos el primer modelo de un **sistema abierto**.

El concepto de sistema abierto fue acuñado en el primer tercio de este siglo por el biólogo Ludwig von Bertalanffy, al notar que el notable y a la vez improbable proceso de permanente equilibrio e incrementado nivel de organización de los sistemas vivos y de muchas de las estructuras sociales, económicas e industriales creadas por el hombre no podía ser explicado bajo la perspectiva de una entropía creciente. La razón de ello habría que buscarla en el hecho de que estos sistemas interaccionan con su entorno: son **sistemas abiertos**.

Estos sistemas intercambian con su entorno flujos de materia, energía e información y estos flujos marcan diferencias esenciales con los sistemas cerrados.

Así, por ejemplo, en un sistema cerrado el estado final hacia el que el sistema evoluciona inexorablemente y el tiempo que tarda en alcanzarlo están únicamente determinados por las condiciones iniciales, y la estructura y la dinámica del sistema se encargan del resto; por ejemplo, la posición de los planetas en un instante dado determina de forma única la posición de los mismos en todo instante posterior y, no solo eso, también permite conocer la posición en los instantes anteriores: para algunos de estos sistemas la flecha del tiempo es

reversible. Por el contrario en un sistema abierto es posible a partir de diferentes condiciones iniciales alcanzar un estado final dado, pero no predeterminado de forma única, utilizando para ello diferentes mecanismos reguladores de los que más adelante diremos algo: es el **principio de equifinalidad**.

Una segunda diferencia para ambos tipos de sistemas radica en su distinto comportamiento respecto al segundo principio de la termodinámica. Esa marcha incontrolable hacia un estado de máxima homogeneidad en el que la evolución del sistema se detiene, y cuya visión última a escala macroscópica es la **muerte térmica** del Universo, no se da en los sistemas abiertos que parecen más bien gobernados por la ley de la evolución de Darwin, cuya base son los principios de organización, regulación, adaptación y finalidad.

La realidad nos muestra como los organismos vivos y muchas de las estructuras artificiales creadas por el hombre presentan una tendencia a una mayor heterogeneidad y a unos niveles crecientes de organización. Ello es debido a que el incremento constante de entropía (¿se pueden utilizar las palabras cansancio y acomodación para definir en lenguaje coloquial esta circunstancia?) que se produce en todo sistema se ve contrarrestado en los sistemas abiertos por una importación de entropía negativa, gracias precisamente a esos flujos que, en forma de adquisición de energía, generación de información, inmigraciones, nuevas formas de pensamiento (en algunos casos generadas por el propio sistema), revoluciones, cambios de objetivos, estructuras y dinámicas, etc, etc.., pueden incluso llegar a disminuir la entropía.

Es claro que estos flujos producen perturbaciones en el sistema pero es la asimilación de los mismos, no su eliminación, la que permite que el sistema continúe funcionando. Quisiera en este punto aconsejar al lector a una breve ojeada a las nuevas teorías de las catástrofes y del caos, y de su interpretación a la luz de las organizaciones empresariales e industriales.

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

Por último es necesario hacer notar que un sistema artificial, y en especial las organizaciones humanas de todo tipo, concebido como abierto, debe en todo momento tener abiertos sus canales de información con el entorno y asumir el conflicto que supone la aceptación de la diversidad, ya que en caso contrario evolucionarán en forma similar a los sistemas cerrados alcanzando su particular muerte térmica y marcándose como fin una degradación del fin original. Las dictaduras como sistemas políticos y, en ocasiones, las administraciones públicas son ejemplos de lo anterior: en ambos casos la muerte burocrática es su final y la perpetuación e incremento de la propia estructura acaba siendo su único objetivo.

9

El modelo presa-depredador: la historia de amor y odio de los lobos y los corderos



LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

La introducción de los conceptos de sistemas cerrados y abiertos ha venido al caso porque el análisis efectuado en el Capítulo 6 no resulta suficiente para Apolodoro y su novia, ya que en el coto, además de los conejos, hay lobos. Conociendo este problema y el interés de Apolodoro y Blancanieves, Pitágoras les cuenta como el estudio de la evolución de poblaciones ha servido de punto de partida para la modelización de sistemas. Para ello les plantea la hipótesis de que en su coto sólo existiesen lobos; aunque el coto es muy fértil, el carácter carnívoro de los lobos hace que éstos carezcan de alimentos y, en consecuencia, su número disminuye de forma que, si designamos por **L(t)** al número de lobos vivos que hay en el día **t**, tenemos

$$L(t+1) = L(t) - s L(t) = (1-s) L(t) = (1-s)^{t+1} L(0); \quad 0 < s < 1 \quad (9.1)$$

siendo **L(0)** el tamaño inicial de la población de lobos y **s** la tasa de decrecimiento de los lobos. Cada vez que transcurre un período de tiempo **T** tal que

$$(1-s)^T = 0.5 \implies T = (\log 0.5) / \log (1-s) \quad (9.2)$$

la población de lobos se reduce a la mitad. La evolución queda reflejada en la Figura 7, aunque es claro que este proceso de reducción, al igual que ocurría con el de crecimiento de los conejos, es válido, tal como demuestra la experiencia del mundo real, mientras la población de lobos no descienda por debajo de un determinado nivel.

El modelo presa-depredador: la historia de amor y odio de los lobos y los corderos

Pero la realidad es que en el coto hay lobos y conejos y, al estar mezclados, las tendencias de crecimiento se invierten: los lobos, al tener conejos que llevarse a las fauces, tienden a incrementar su número al tiempo que disminuyen el número de conejos, de forma que esta interacción se refleja en el esquema de la Figura 8, en el que la flecha curva horizontal con un signo + expresa el hecho de que los conejos interactúan con los lobos facilitando su incremento: cuantos más conejos haya, más lobos podrán alimentarse y más crecerá su número.

Análogamente, el signo - que aparece en la flecha que va desde el círculo de lobos al de conejos significa que un incremento en el número de lobos tiende a disminuir el de conejos y el signo - del bucle de los lobos expresa que un aumento en el número de lobos tiende, lo que puede parecer una contradicción, a reducir su número en el futuro.

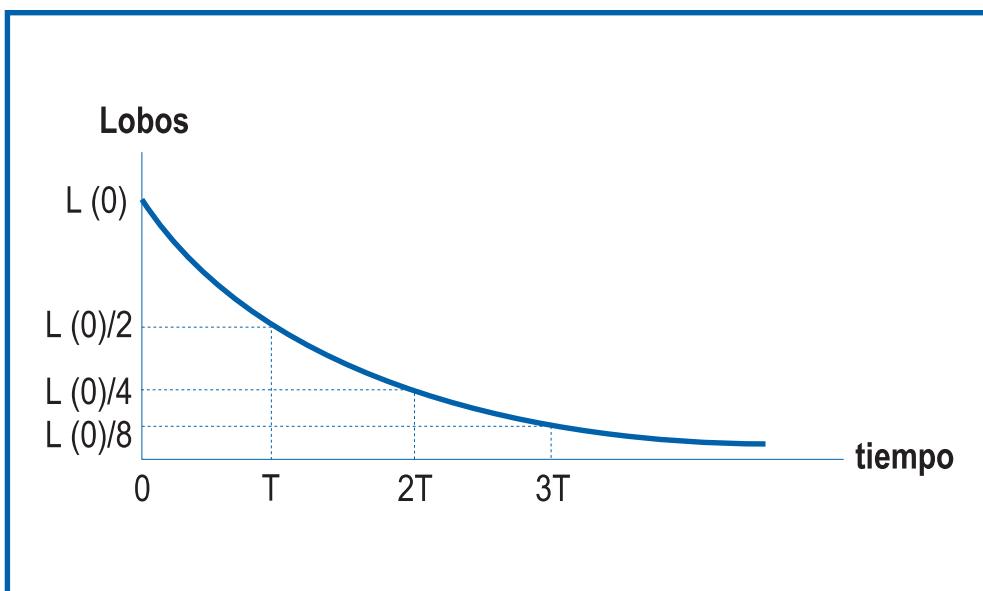


Figura 7. - CURVA DE EVOLUCIÓN DE LA POBLACIÓN DE LOBOS CUANDO NO HAY SUFICIENTE ALIMENTO -

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

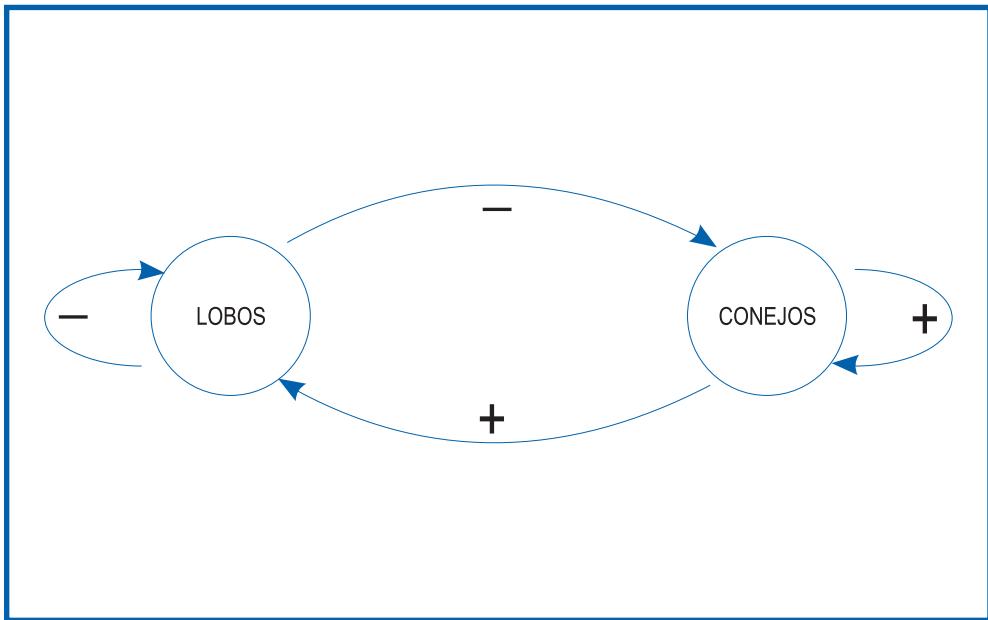


Figura 8. - ESQUEMA DE INTERACCIÓN ENTRE LOBOS Y CONEJOS -

¿Hay forma de expresar con matemáticas esta situación? Si pensamos que cuanto mayor sea la frecuencia con la que lobos y conejos pueden encontrarse mayor será la frecuencia con la que un conejo será devorado, disminuyendo así la población de conejos e incrementando la posibilidad de que los lobos tengan lobeznos, parece natural suponer que esta frecuencia de contactos es proporcional al producto del número de lobos por el de conejos, de forma que podemos escribir

$$\begin{aligned} C(t+1) &= (1+r) C(t) - k C(t) L(t) \\ (9.3) \end{aligned}$$

$$L(t+1) = (1-s) L(t) + h C(t) L(t)$$

donde:

r = tasa diaria de crecimiento de los conejos cuando están aislados;

El modelo presa-depredador: la historia de amor y odio de los lobos y los corderos

s = tasa diaria de disminución de los lobos cuando están aislados;
 k = tasa por la cual los encuentros entre lobos y conejos reducen la población de conejos;

$k C(t) L(t)$ = número de conejos devorados por los lobos en un día en el que se han producido $C(t) L(t)$ encuentros;

h = tasa por la cual los encuentros incrementan la población de lobos; y

$h C(t) L(t)$ = número de nacimientos de lobos en un día como resultado del suministro de conejos.

Las ecuaciones (9.3), cuando tanto las muertes y nacimientos naturales como los encuentros pueden darse en cualquier momento, se convierten en el sistema de ecuaciones diferenciales (9.4), que

$$C'(t) = rC(t) - kC(t) L(t) = rC(t) (1-(k/r) L(t)) \quad (9.4)$$

$$L'(t) = -sL(t) + hC(t) L(t) = -sL(t) (1-(h/s) C(t))$$

conforma las ecuaciones de un **sistema presa-depredador**, que sirven para modelar situaciones semejantes a la estudiada: ratones y gatos, defraudadores de Hacienda e inspectores fiscales (no es broma), etc.

A estas alturas Apolodoro y Blancanieves están alucinados. Esto es aprovechado por el implacable Pitágoras para continuar explicándoles que el estudio de la evolución de las poblaciones desde una perspectiva de modelización sistémica, aunque este adjetivo no fuera explícitamente utilizado, viene de muy antiguo. Así, ya en 1202, Leonardo de Pisa, más conocido en el mundo de las matemáticas por el apodo de Fibonacci, propuso el primer modelo matemático de la dinámica de una población al estudiar cual es el número de descendientes $y(n)$ en la enésima generación de una pareja inicial de conejos, llegando a una ecuación del tipo llamado de **renovación**,

$$y(n) = y(n-1) + y(n-2) \quad (9.5)$$

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

Las sucesiones de números que satisfacen esta relación de recurrencia son conocidas como **sucesiones de Fibonacci**, la más simple de las cuales es

$$1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, \dots$$

Son muchos los matemáticos ilustres que han contribuido al desarrollo de estos métodos de modelización (Bernoulli, Lotka, Barlett, etc). De hecho las ecuaciones (9.4) fueron obtenidas por primera vez por el italiano Volterra, que demostró su carácter cíclico y las expuso en su libro "La lucha por la vida".

Hartos del aluvión de erudición que Pitágoras vuelca sobre ellos, Blancanieves y Apolodoro le instan perentoriamente a que les diga de una vez cuantos conejos y lobos va a ver en el coto a partir de este momento en el transcurso del tiempo. Por primera vez Pitágoras ha de reconocer que no puede satisfacer ese requerimiento, ya que no hay forma de integrar el sistema (9.4) y encontrar así ecuaciones explícitas de $C(t)$ y $L(t)$ en función del tiempo, pero que algunos datos interesantes si les puede dar.

Por lo pronto el modelo tiene una solución evidente cuando, para todo valor de t , $C'(t)$ y $L'(t)$ se anulen, ya que entonces un cálculo elemental nos da la solución

$$C(t) = s/h ; L(t) = r/k \quad (9.6)$$

de forma que el punto **E(s/h, r/k)** es un punto de equilibrio, en el sentido de que si, por cualquier razón, en un momento dado llega a haber s/h conejos y r/k lobos las dos poblaciones permanecen absolutamente estables.

En un análisis más general Volterra analizó el comportamiento del sistema eliminando del mismo la variable tiempo y llegando a la expresión

El modelo presa-depredador: la historia de amor y odio de los lobos y los corderos

$$R = \frac{dC}{C(r - kL)} = \frac{-dL}{L(s - hC)} \quad (9.7)$$

que es una ecuación diferencial del tipo llamado de variables separadas, cuya fácil integración conduce a la ecuación

$$s \lg(C(t)) - h C(t) + r \lg(L(t)) - k L(t) = M \quad (9.8)$$

donde $\lg(.)$ es el logaritmo neperiano y

$$M = s \lg(C(0)) - h C(0) + r \lg(L(0)) - k L(0) \quad (9.9)$$

Nuestros protagonistas, tras un laborioso trabajo de campo, comprueban que realmente el modelo parece representar en forma adecuada la evolución de lobos y conejos y además llegan a estimar los valores de los parámetros: $r = 3$, $s = 2$, $k = 1$ y $h = 0.5$.

Las curvas (9.8) tienen el aspecto (ver Figura 9) de una elipse aplastada por uno de sus extremos, dando lugar a una representación conocida como **plano de fases**. Cada curva de la figura corresponde a unas condiciones iniciales diferentes y recibe el nombre de **trayectoria**. El punto de equilibrio **E** es interior a todas ellas y en nuestro caso es **E(4,3)**.

La situación inicial y actual, que tanto preocupa a nuestros amigos, es la definida por el punto **S=(C(0), L(0))**. A partir de ella se puede seguir la evolución de la población a través de la curva correspondiente. Así, como en nuestro ejemplo **C(0)<4=s/h** y **L(0)>3=r/k**, de acuerdo con el sistema (9.4) **C'(t)** es negativa, lo que significa que el número de conejos disminuye, en tanto que **L'(t)** es positiva, lo que implica el aumento de los lobos. Esta situación se prolonga en el tiempo hasta alcanzar el punto **A**, y desde ese momento conejos y lobos decrecen a la vez hasta alcanzar el punto **B** para, a partir de ese instante y aprovechando la escasez de lobos, continuar creciendo la población de conejos mientras que los lobos, por su escaso número,

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

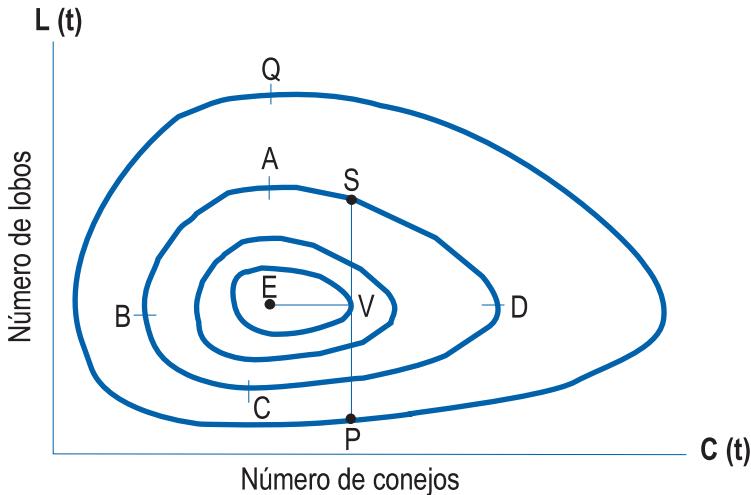


Figura 9. - PLANO DE FASES DE VOLTERRA DEL SISTEMA "LOBOS-CONEJOS" -

son ya incapaces de reproducirse al ritmo necesario para mantener la población y siguen disminuyendo. Esta situación tiene su final en el punto **C**, a partir del cual tanto lobos como conejos crecen hasta alcanzar el punto **D**, y desde ese momento los lobos, superalimentados, ven incrementar su número de tal forma que los conejos comienzan a disminuir, cerrándose el ciclo al volver a la situación inicial.

A la vista de la explicación, Blancanieves y Apolodoro, ejemplares típicos del autollamado “*homo sapiens*”, haciendo uso amplio y discutible del mandato divino de dominar la tierra, se disponen a intervenir en el coto a la manera que suele ser habitual en estos casos: como estiman que hay demasiados lobos, y no tiene paciencia para esperar a que se cumpla el tiempo que Pitágoras ha calculado, con la ayuda de un ordenador y utilizando los llamados métodos numéricos del análisis, que se tardará en alcanzar el punto **C**, que corresponde al mínimo de lobos, se disponen a organizar una serie de cacerías orientadas a reducir el número actual de lobos dejando intacta la población de conejos. Como siempre que se planifica un proyecto que se

El modelo presa-depredador: la historia de amor y odio de los lobos y los corderos

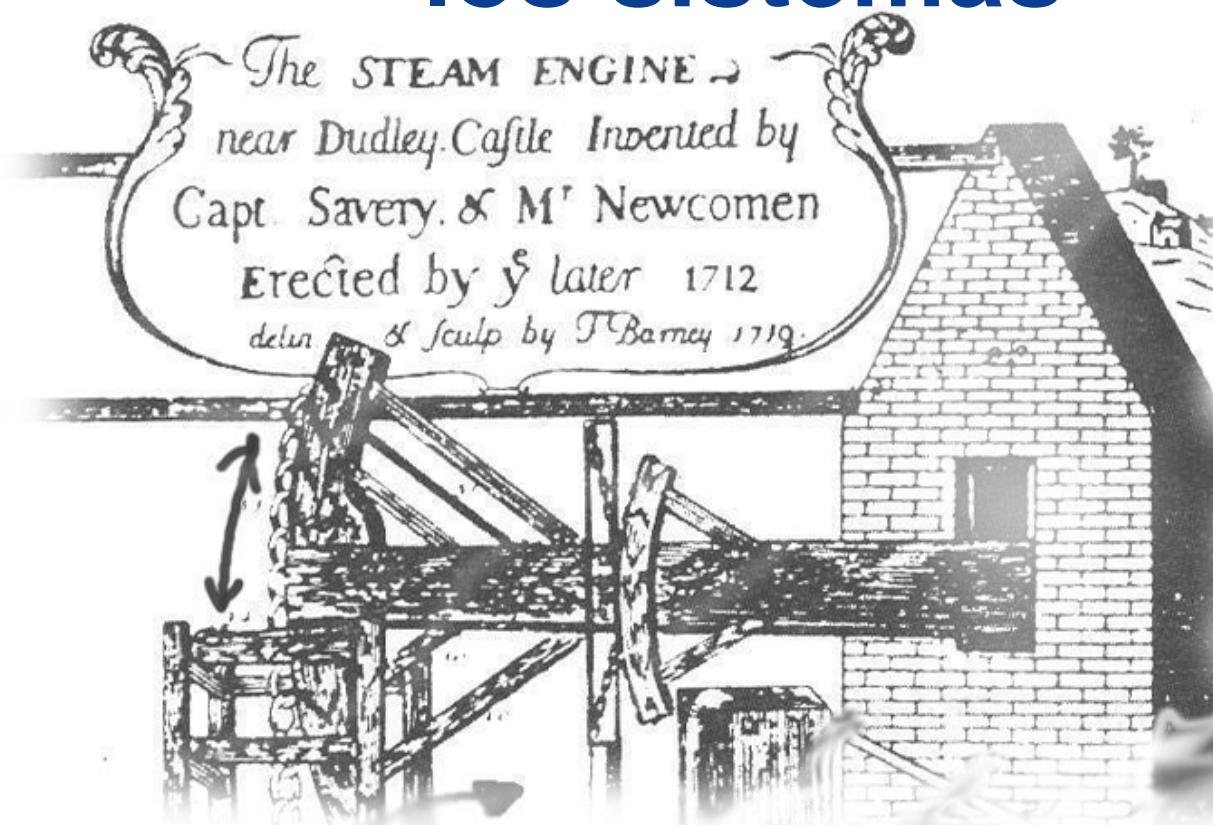
cree bueno la ley de Murphy se cumple inexorablemente y nuestros amigos fallan en su objetivo: la situación conseguida, definida por el punto **P**, es todo lo contrario de la deseada. ¡La han armado buena! Al haber tan pocos lobos, la prolífica naturaleza de los conejos les hace crecer en forma tal que los pocos lobos supervivientes encontrarán alimento de sobra para multiplicarse y llegar así a alcanzar en algún momento la situación definida por el punto **Q**, mucho peor aún que la inicial.

La bronca de Pitágoras es descomunal. No se han enterado de nada en lo que se refiere a los sistemas. Para alcanzar una trayectoria más estable, y si sólo se quiere matar lobos, con eliminar una cantidad de ellos que les situara en el punto **V** hubiera sido suficiente. Incluso cazando también algunos conejos podrían haber alcanzado el punto **E** de equilibrio, aunque desde el punto de vista de hacer máxima las capturas de conejos este punto de equilibrio pudiera no ser óptimo.

El comportamiento de Blancanieves y Apolodoro no es inusual, aunque les costará salir de estas páginas pues está visto que no se adaptan a la filosofía sistémica. La técnica de desnudar a un santo para vestir a otro, que ellos utilizaron, es práctica habitual en las organizaciones y en la política: casi todo el mundo conoce alguna actuación en su lugar de trabajo con la que se creyó resolver un problema y surgieron otros peores, y son innumerables los ejemplos de desastres ecológicos generados en cualquier parte del mundo que tuvieron su origen en la buena intención de sacar a flote a una región deprimida. La causa es siempre el olvido de que lo bueno para cada una de las partes no es forzosamente lo mejor para el total.

10

Una clasificación de los sistemas



En las situaciones que hemos estado analizando hemos ido elaborando modelos cada vez más complejos de un fenómeno, a costa de ir introduciendo una herramienta matemática cada vez más sofisticada y difícil de manejar. ¡Y esto es sólo el principio! Tal vez por esta razón Blancanieves y Apolodoro creen que por ahora tienen más que de sobra con lo que Pitágoras les ha contado sobre los sistemas y, tal como anunciábamos, han decidido abandonar el tema por el momento. Confío en que el pío lector será más constante y continuará con la lectura de esta monografía.

En los Capítulos anteriores se ha querido traslucir como el mundo natural, la actividad humana y la interacción entre ambas ofrecen tantos aspectos dignos de análisis que, sin perder nunca el carácter unitario del Universo, se hace poco menos que imprescindible establecer una clasificación de los sistemas que el hombre puede concebir en relación con los objetos analizados.

Una de las más completas de estas clasificaciones del conocimiento es la descrita en la Enciclopedia Británica. Esquemáticamente esa clasificación establece diez grandes bloques, que luego se desarrollan en temas y estos a su vez en subtemas. Por razones de espacio vamos a enumerar tan sólo los bloques y los temas.

Bloque 1.- El espacio, el tiempo, la materia y la energía

1. El átomo.
 2. Energía, radiación, estados y transformaciones de la materia.
 3. El universo físico.
-

Bloque 2.- La Tierra

1. Composición estructura y propiedades de la Tierra.
2. La atmósfera y la hidrosfera.
3. La superficie de la Tierra.
4. La historia de la Tierra.

Bloque 3.- La vida en la tierra

1. La naturaleza y la variedad de las cosas vivas.
2. La base molecular de los procesos vivos.
3. Las estructuras y las funciones de los organismos.
4. Respuestas de comportamiento de los organismos.

Bloque 4.- La vida humana

1. Etapas en el desarrollo de la vida humana.
2. La salud y las enfermedades.
3. El comportamiento y la experiencia humanos
4. La comunicación y el lenguaje.
5. Los aspectos de la vida humana y cotidiana.

Bloque 5.- La sociedad humana

1. La cultura.
2. La organización y el cambio sociales.
3. La producción, distribución y utilización de la riqueza.
4. Política y gobierno.
5. La ley.
6. La educación.

Bloque 6.- El arte

1. El arte en general.
2. Artes particulares.

Bloque 7.- La tecnología

1. Naturaleza y desarrollo de la tecnología.
 2. Los elementos de la tecnología.
 3. Principales campos tecnológicos.
-

Bloque 8.- La religión

1. La religión en general.
2. Las religiones particulares.

Bloque 9.- La historia de la Humanidad

1. Las antiguas civilizaciones del Oriente Próximo, Europa y Norte de África hasta el 400.
2. Las civilizaciones medievales en estas zonas hasta el 1500.
3. Las civilizaciones en Medio y Extremo Oriente hasta el 1870.
4. Las civilizaciones del África Subsahariana hasta el 1885.
5. Las civilizaciones de la América precolombina.
6. El mundo moderno hasta el 1920.
7. El mundo desde el 1920.

Bloque 10.- Ramas del conocimiento formal

1. La lógica.
2. Las matemáticas.
3. La ciencia.
4. La historia y las humanidades.
5. La filosofía.

Por otro lado, y desde la perspectiva de la teoría de los sistemas, el paulatino incremento en la complejidad de los sistemas sugiere la existencia de una jerarquía de niveles de complejidad. Hay serios intentos de intentar establecer una jerarquía de carácter global que tenga en cuenta simultáneamente la estructura, la función y la evolución del sistema. En ausencia de esta clasificación absoluta el esquema jerárquico más popular es el de Boulding, que nosotros vamos a asumir y que servirá de punto de apoyo a epígrafes posteriores. Es de notar su notable paralelismo con la clasificación de la Enciclopedia, aunque los puntos de partida hayan sido diferentes.

NIVEL	DESCRIPCIÓN Y EJEMPLOS	TEORÍA Y MODELOS
Estructuras estáticas	Atomas, moléculas, cristales, estructuras biológicas microscópicas	Fórmulas estructurales de la química, cristalografía, descripciones anatómicas
Dinámica de sistemas de relojería	Rejones, máquinas convencionales, sistemas solares	Mecánica newtoniana y relativista
Mecanismos autorregulados	Termostatos, servomecanismos, mecanismos orgánicos homeostáticos	Cibernética; teorías de la realimentación y de la información
Sistemas abiertos	Células y organismos en general	Extensión de la Física a sistemas automanteridos por un flujo de materia (metabolismo): comienzo de la vida celular. Análisis de la información almacenada en un código genético
Organismos de bajo nivel	Organismos vegetales de diferenciación creciente; distinción de la reproducción y del individuo funcional	Modelos y teorías escasos
Animales	Importancia creciente del flujo de información; procesos de aprendizaje; comienzo de la conciencia	Teorías de los autómatas y de la regulación
Hombre	Simbolismo; pasado y futuro; distinción entre el yo y el mundo, conciencia del yo, el lenguaje	Teoría del simbolismo; uso no formalizado de la lógica borrosa
Sistemas socio-culturales	Poblaciones y organismos; comunidades culturales humanas	Leyes estadísticas y dinámicas de las poblaciones; sociología, historia y economía. Teoría de los sistemas culturales
Sistemas simbólicos	Lenguaje, lógica formal, matemáticas, ciencias, artes, ética. Imaginación	Algoritmos simbólicos matemáticos, gramática, música

Tabla 3. - CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS (BOULDING) -

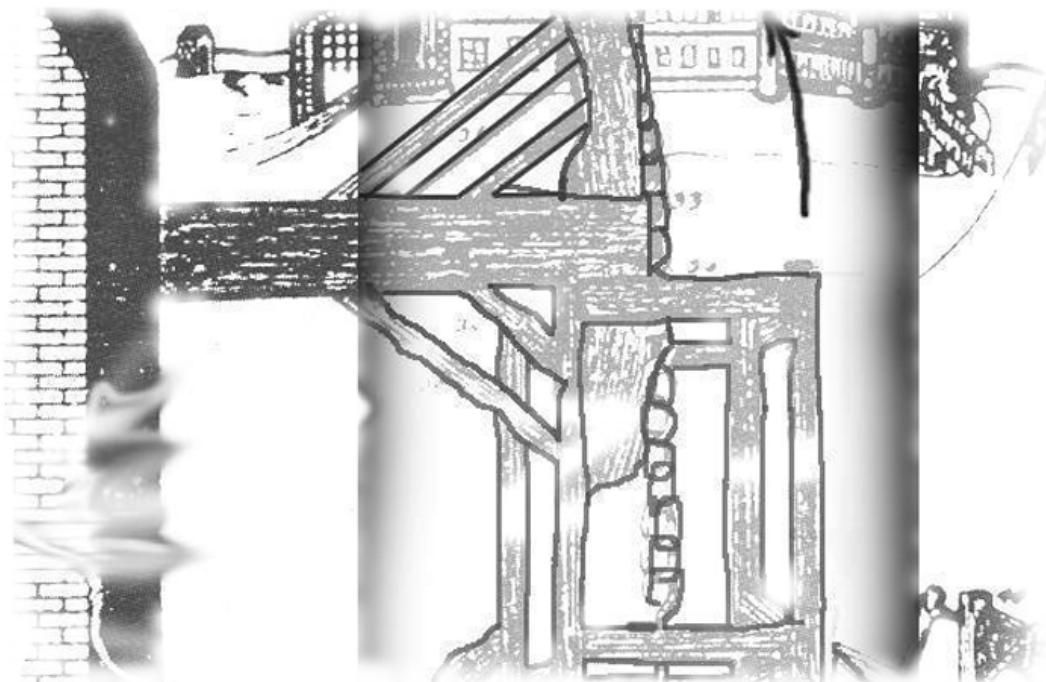
LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

Es fácil identificar y estudiar sistemas pertenecientes a los cuatro primeros niveles de la escala, pero la identificación y comprensión de sistemas pertenecientes a los niveles superiores es una tarea cuya dificultad se incrementa con el nivel y cuya comprensión última se nos escapa por ahora.

Existen otras muchas caracterizaciones de los sistemas; una de ellas, muy usual pero poco estructurada, los divide en estáticos y dinámicos, naturales y artificiales, deterministas y aleatorios, con el entorno bien definido o impreciso, físicos y simbólicos, abiertos y cerrados, etc, etc,...

11

Del paradigma cartesiano al sistémico



El método cartesiano no sólo no es el único posible, como lo demuestran la filosofía y el quehacer científico orientales, sino que, cuando animados por el éxito obtenido en su aplicación a fenómenos deterministas, se le ha intentado aplicar a fenómenos de otra naturaleza, como los sociales, económicos, organizativos, ecológicos, etc.. , ha mostrado debilidades insuperables y conocido rotundos fracasos que, sin descalificarlo, han venido a dejar bien delimitado su campo de aplicación y sus posibilidades.

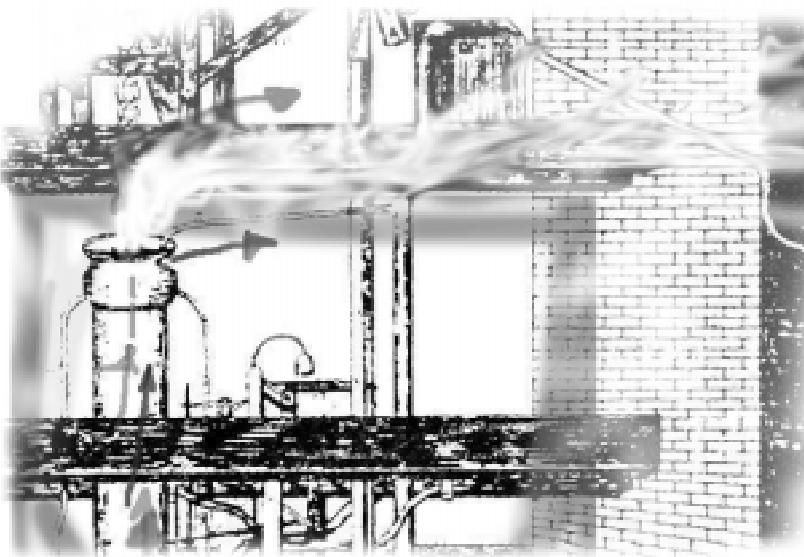
Por ello el pensamiento filosófico y científico de los siglos XIX y XX ha ido poco a poco elaborando un nuevo método que empieza a gestarse cuando en el siglo XIX los termodinámicos substituyen el binomio cartesiano **estructura-función** por el de **estructura-evolución**, siguiendo el paradigma de la **Mecánica Estadística**. Ambos paradigmas han subsistido con independencia hasta que biólogos (L. von Bertalanffy) y sociólogos en el primer tercio del siglo XX han denunciado lo absurdo de esta circunstancia y han motivado la búsqueda de un paradigma unificador que se ha desarrollado por dos vías.

La primera de estas vías se desarrolla en Europa (Monod, Piaget, Thom) y desemboca en el **paradigma estructuralista**, que propone describir el objeto en su totalidad, funcionando y evolucionando de tal manera que, aún aceptándolo estructurado, esta estructura no es estática sino evolutiva. Este trinomio **evolución-estructura-función**, mucho más próximo a la perspectiva termodinámica, choca frontalmente con el precepto cartesiano reduccionista e introduce la irreversibilidad.

El pensamiento de N. Wiener es el padre de la segunda vía, la **Cibernética**, palabra que surge por primera vez en 1947. En un sentido estricto puede ser identificada con la teoría de los servomecanismos y, en sentido amplio, tiene que ver con los procesos de autorregulación u **homeostasis** que, observados en los organismos biológicos, son trasladados a dispositivos eléctricos, mecánicos y electromecánicos. Esta vía se desarrolla en USA y, continuada por los trabajos de R. Ashby, desemboca en el **paradigma cibernético**: en lugar de centrar la atención en los mecanismos o estructuras orgánicas, reconociendo la dificultad, la imposibilidad o la falta de interés por llegar a su conocimiento profundo, propone ignorarlas encerrándolas en **cajas negras**, e intentando, por el contrario, comprender los comportamientos del objeto en referencia permanente a sus **fines**, descritos en relación con el **entorno** dentro del cual **funciona y evoluciona**. La noción de estructura se difumina en beneficio de la noción de “**interface**” o “**medio de comunicación**” entre un fin o proyecto concebido por el objeto y un entorno identificado. De esta forma para definir a un corredor de campo a través desde la perspectiva del espectador de la carrera, será más adecuado utilizar, en vez de una descripción anatómica del mismo, la conjunción del proyecto u objetivo del corredor (la victoria en la prueba), que pretende conseguir funcionando de una manera específica (el entrenamiento y la estrategia de la carrera) dentro de un entorno o contexto (los rivales, el perfil del terreno, la climatología, etc,...).

12

El paradigma sistémico: la Teoría General de Sistemas



LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

La integración de estos dos paradigmas complementarios, que son el estructuralista y el cibernetico, empieza a construirse explícitamente a partir de 1958 para dar lugar al **paradigma sistémico**. Fue intuido de forma genial y bautizado hacia 1930 por Ludwig von Bertalanffy como el **Sistema Generalizado**. Hay que advertir que el nombre [2] con el que Bertalanffy presentó su teoría fue el de “**General System Theory**”, que puede ser traducido tanto como por **Teoría General del Sistema** como por **Teoría del Sistema General o Generalizado**, y ambas traducciones, al par que válidas, reflejan los dos objetivos del pensamiento sistémico:

- a) por una parte es una teoría generalista que ofrece una visión unitaria del mundo hasta hace poco insospechada, devolviendo a la palabra **Universo** su carácter global absoluto;
- b) por otro lado, es una teoría para modelar objetos, naturales o artificiales, simples o complejos, existentes o por aparecer, con ayuda de una herramienta que es el **sistema generalizado**, del que J.L. Le Moigne, en su espléndido libro “*La théorie du système général*” [3], aceptando una definición de la palabra objeto tan amplia como se quiera, da una primera definición:

“un **objeto** dotado de fines u objetivos que, en un entorno bien delimitado, ejerce una **actividad**, a la vez que ve **evolucionar su estructura interna a lo largo del tiempo sin perder por ello su identidad**”.

El paradigma sistémico: la Teoría General de Sistemas

La Figura 10 refleja esquemáticamente este objeto activo y estructurado que evoluciona dentro de sus fronteras en relación con sus fines.

Cuando analizamos un objeto podemos fijar nuestra atención, con diferente peso, en cada uno de los tres aspectos que caracterizan a la herramienta que nos va a permitir modelizarlo: el aspecto **funcional**, que centra su estudio en la actividad que el objeto desarrolla, el **orgánico**, que enfoca su análisis en la estructura, tanto estática como dinámica, y el **genético**, que lo hace en su evolución y devenir, de tal forma que la percepción y el modelo que tengamos del objeto estudiado será una ponderación entre el ser, el hacer y el devenir del mismo. Cada ponderación nos conducirá a un modelo o sistema asociado al objeto modelo que puede ser representado en un diagrama triangular clásico, de tal manera que cuanto más próximo este el punto representativo del modelo (Figura 11) al centro de gravedad del triángulo tanto más armónico y equilibrado resulta.

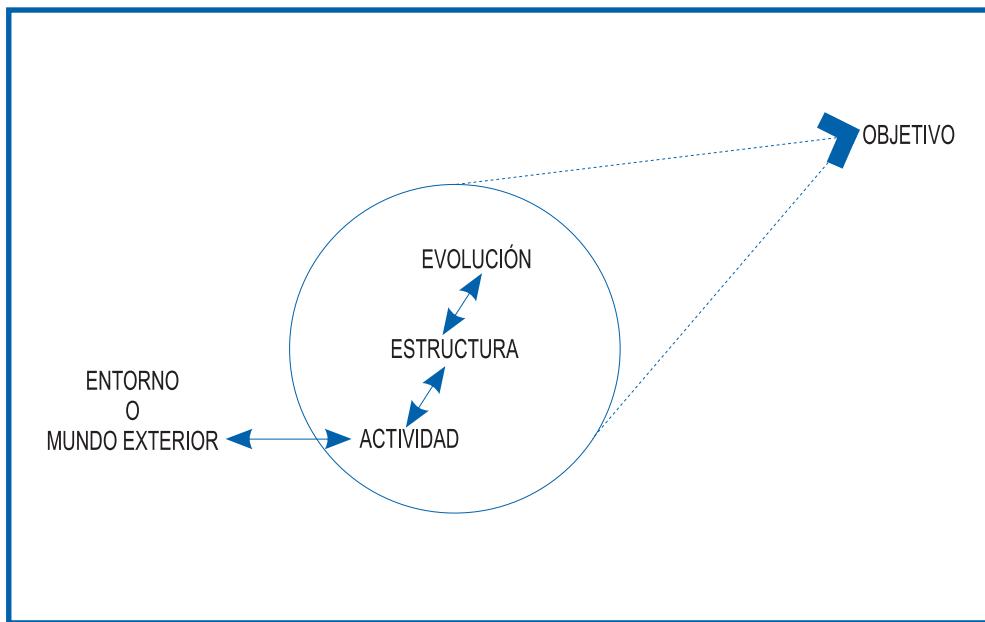


Figura 10. - EL SISTEMA GENERALIZADO -

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

El modelo así establecido tiene todas las características de lo que hemos llamado un sistema general o generalizado, es decir, el tipo de relación que los matemáticos designan con el nombre de **isomorfismo**, mientras que el modelo obtenido puede ser válido no sólo para el objeto percibido en concreto, sino que puede haber otros muchos objetos, recordemos los casos descritos en el Capítulo 6, de naturaleza completamente distinta pero que para nuestros fines podrían ser descritos por el mismo modelo; es lo que los matemáticos designan con el nombre de **homomorfismo**. De igual forma de un mismo objeto podrían establecerse muy diversos modelos, cada uno de los cuales sería isomorfo al sistema generalizado y homomórfico con el objeto percibido. Esto es lo que se quiere reflejar en la Figura 12. No es así de extrañar que de cosas y personas haya tantas opiniones como opinantes.

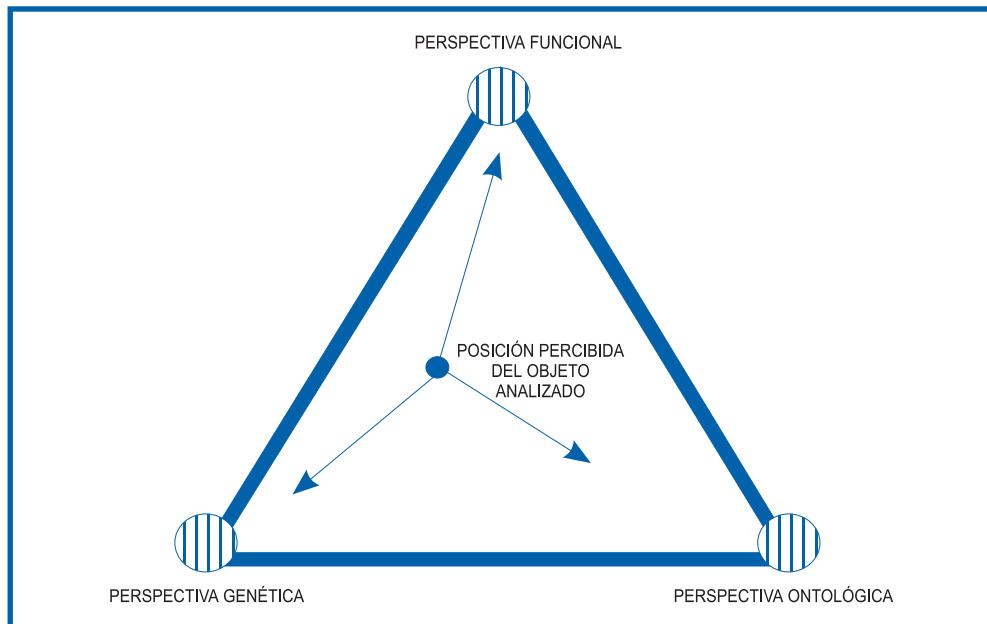


Figura 11. - TRIPLE PONDERACIÓN SISTÉMICA DE UN OBJETO -

El paradigma sistémico: la Teoría General de Sistemas.

Es obvio que la introducción de este paradigma no debe ser entendido como la culminación del pensamiento humano. Actualmente es generalmente aceptado el llamado **principio de inconmensurabilidad** (¡qué palabreja!) **lógica** entre los sucesivos paradigmas, que pone de relieve la imposibilidad de dar una prueba estricta de la superioridad de un paradigma sobre otro.

Por otra parte según la epistemología actual, basada en la historia de las ciencias concretas, toda ciencia empírico-formal estructurada, así como su método de investigación, por más que recoja durante años resultados importantes fruto de un serio esfuerzo intelectual y experimental, es ciencia humana, y por tanto contingente.

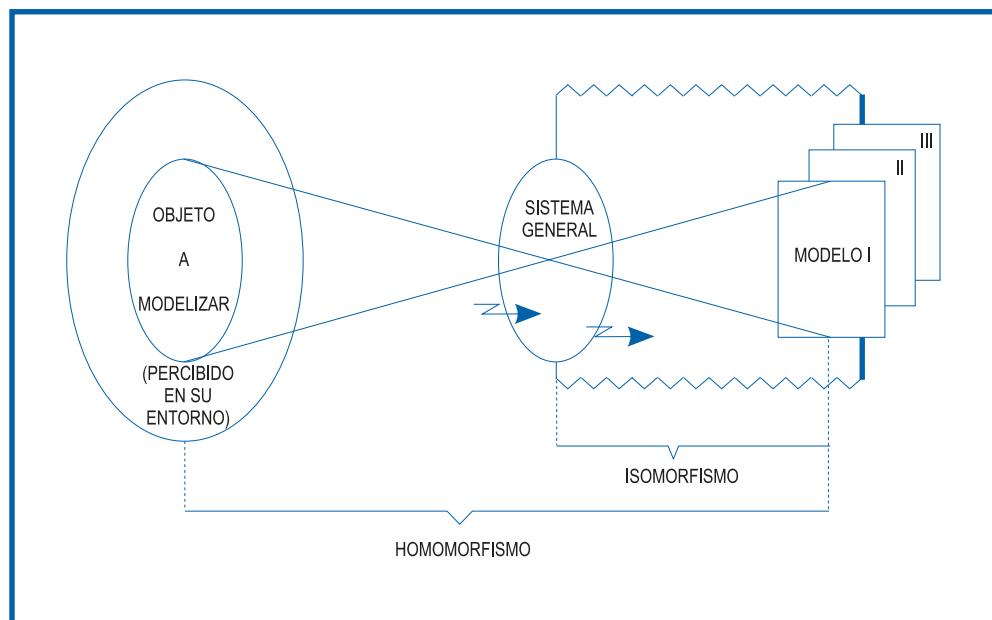


Figura 12. - EL HOMOMORFISMO-ISOMORFISMO SISTÉMICO -

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

A estas alturas ya me resulta imposible resistir mi deformación profesional y le voy a mandar deberes. Si le parece vamos a hacer una prueba, sugerida por R.L. Ackoff, para ver si he conseguido explicar lo que es el Sistema Generalizado. A tal fin observe la Figura 13; sin doblar el papel ni levantar el lápiz de él se pretende unir los nueve puntos con un trazo de cuatro segmentos de línea recta. Inténtelo.

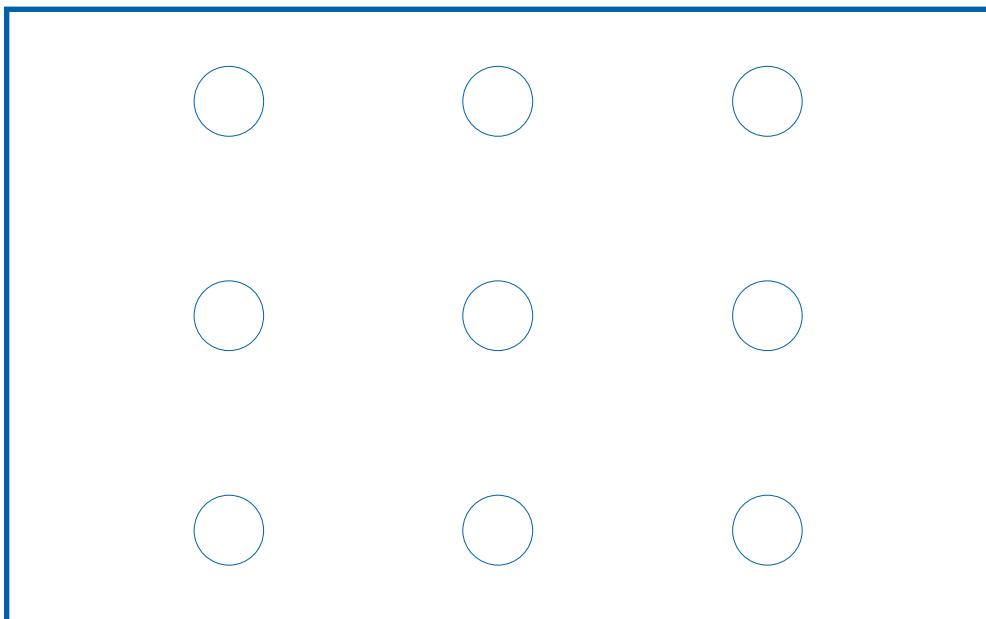
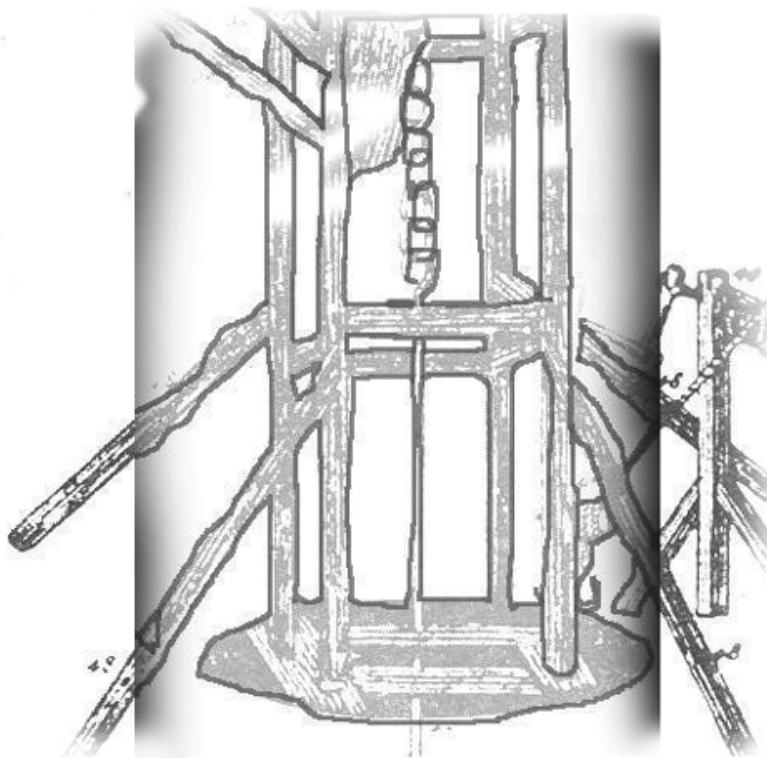


Figura 13. - PROBLEMA ELEMENTAL DE MODELIZACIÓN SISTÉMICA -

13

El sistema de representación



J. de Migny
Burgesses q
STA

¿Resolvió el problemita anterior? Si lo hizo, enhorabuena para los dos. Si no fue así, no se preocupe; lo único que ha ocurrido es que no ha percibido el objeto dentro de un entorno. No se limite a considerar tan sólo los nueve puntos y amplíe su campo de percepción al “exterior” del cuadrado, de forma que pueda dibujar por el mismo una parte de los segmentos; inténtelo de nuevo y, en todo caso, al final de este Capítulo le daré una solución.

De la misma forma que una cámara de fotos es un útil que permite obtener una imagen o modelo, una fotografía en este caso, más o menos aproximado del objeto fotografiado, dependiendo de los conocimientos técnicos, la sensibilidad y los objetivos que con la fotografía persigue el fotógrafo, el Sistema Generalizado y la Teoría General de Sistemas, su “soporte técnico”, son herramientas que permiten, tomando la terminología de Le Moigne, **sistemografiar** un objeto real obteniendo, de acuerdo con los fines del modelizador un modelo al que llamaremos **sistema**. El proceso de generación y el propio sistema que resulta como modelo son a su vez y conjuntamente un modelo sistémico del modelizador pues en nuestros modelos nos reflejamos nosotros mismos; no sea pues demasiado duro al “modelar” a otros: lo que piense de los otros es un reflejo de lo que es usted mismo; en particular, no haga un modelo demasiado crítico del libro.

Este modelo del modelizador es conocido como **Sistema de Representación** y es a los efectos que nos ocupa lo que el binomio

fotógrafo-cámara de marca o tipo específico es al modelo fotográfico. Así, y tal como muestra la Figura 14, la obtención de un modelo de un objeto desde la perspectiva de la Teoría General de Sistemas es el resultado de la acción conjunta del modelizador, el sistema de representación y el sistema generalizado.

De esta forma, el modelizador, al crear un sistema o modelo sistémico del objeto estudiado, pretende, no ya copiar el objeto, cosa que por lo demás puede ser imposible, sino que, actuando sobre el objeto a partir del modelo, transformarlo a la vez que incrementa su conocimiento del mismo. Le ocurre al modelizador sistémico lo que al Holandés Errante: está condenado a reconcebir continuamente sus modelos, porque ellos, a su vez, le reconciben a él. No hay acción de algún tipo que no tenga su reacción, tal como el biólogo polaco Theodor Dobzhanski resume en un corto poema:

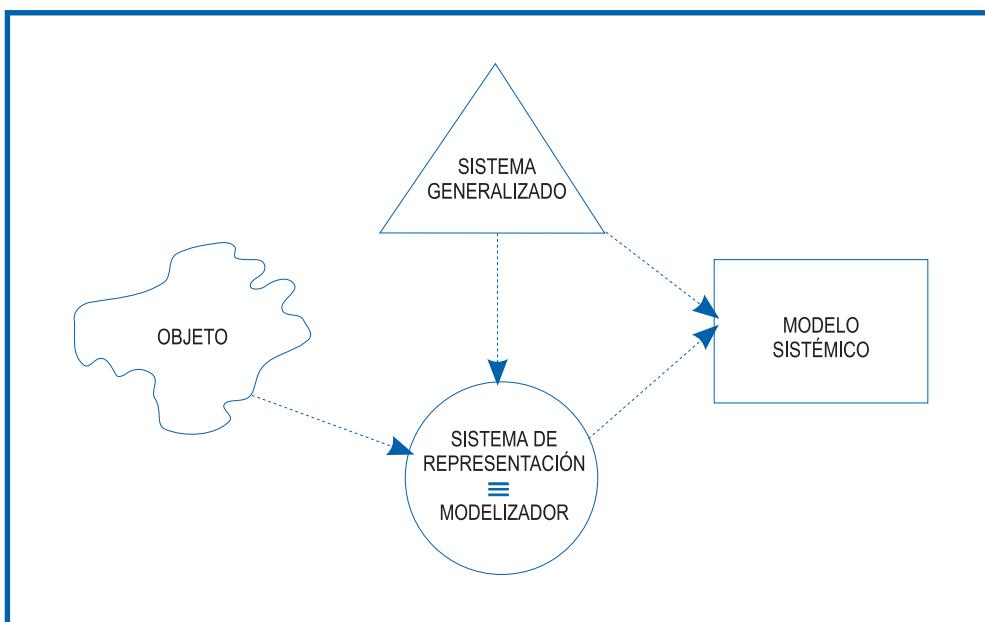


Figura 14. - LA MODELIZACIÓN SEGÚN LA T.G.S. -

*Al cambiar lo que sabe sobre el mundo
el hombre cambia el mundo que conoce;
al cambiar el mundo en el que vive,
el hombre se cambia a si mismo.*

¡Ah!, antes de seguir, y por si no tuvo éxito, le doy la solución prometida al problema de los puntos. Es la Figura 15.

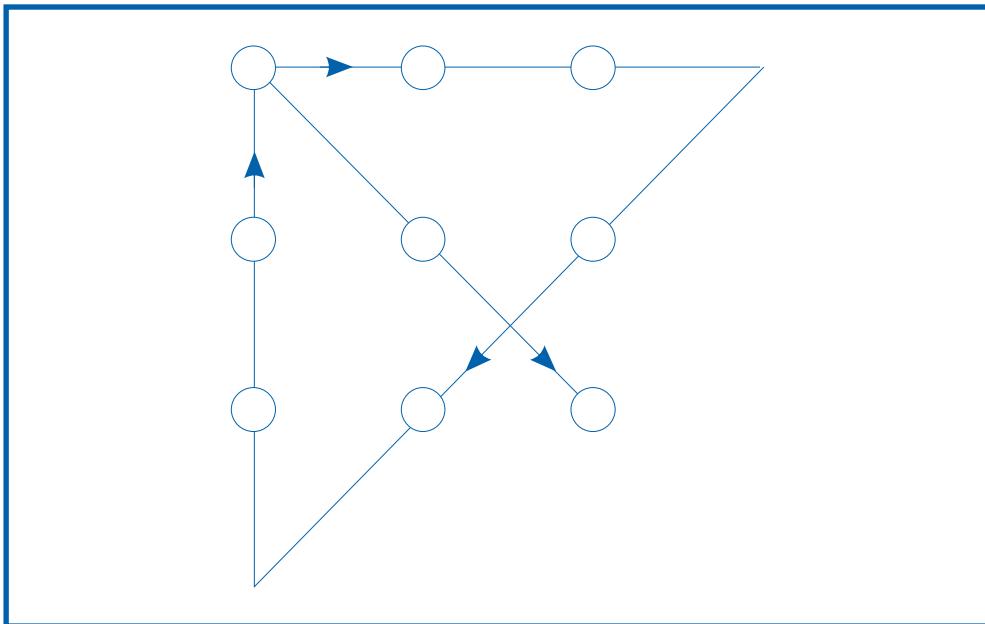
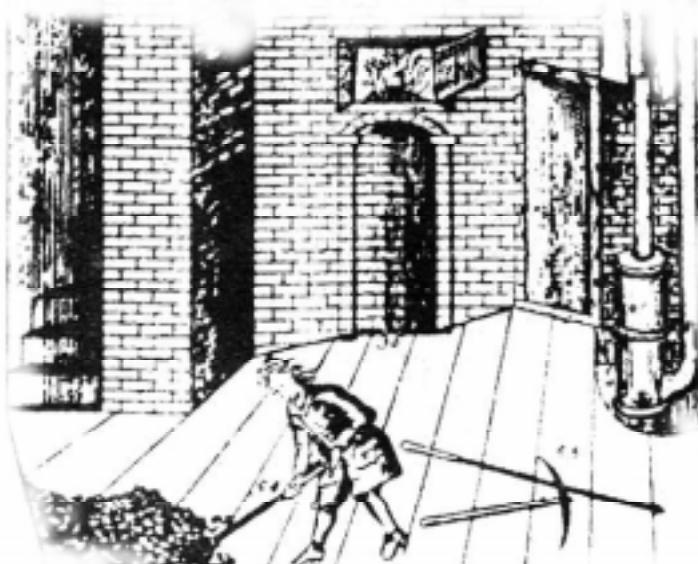


Figura 15. - UNA SOLUCIÓN SISTÉMICA AL PRIMER PROBLEMA ELEMENTAL DE MODELIZACIÓN -

14

El proceso de modelización sistémica



Este epígrafe está dedicado a resumir la visión que del proceso de modelización sistémica es desarrollada por J.M. Le Moigne [3].

La Teoría General de Sistemas tiene una percepción dinámica de la realidad como constituida por procesos. Un **proceso** es todo cambio en el tiempo, pero no forzosamente en función del tiempo, de materia, energía y/o información.

Desde esta perspectiva el objeto, diferenciado y distinguido de su entorno, es percibido como un proceso y su entorno constituido por procesos. El proceso que representa el objeto es modelizado por medio de un artificio, heredado de los cibernéticos, conocido como **caja negra**, algo activo, cuya estructura interna es desconocida, que unas veces actúa sobre procesos del entorno, comportándose en tal caso como un **campo**, al que llamaremos **procesador** y en otras ocasiones es afectado por procesos del entorno, identificándose con un **flujo**. Conviene recordar en este punto que un modelo no es otra cosa que un flujo de información procesado por el modelizador. Un sistema es concebido inicialmente como una gran caja negra que no podemos abrir, de tal forma que todo lo que se puede decir respecto a él es lo que sale de él y lo que entra. La caja negra se relaciona con el entorno, según se esquematiza en la Figura 16, recibiendo de él unas entradas y emitiendo unas salidas.

El fenómeno identifiable por el cual se reconoce la interacción recibe el nombre de **transacción o suceso**: le daremos el nombre de

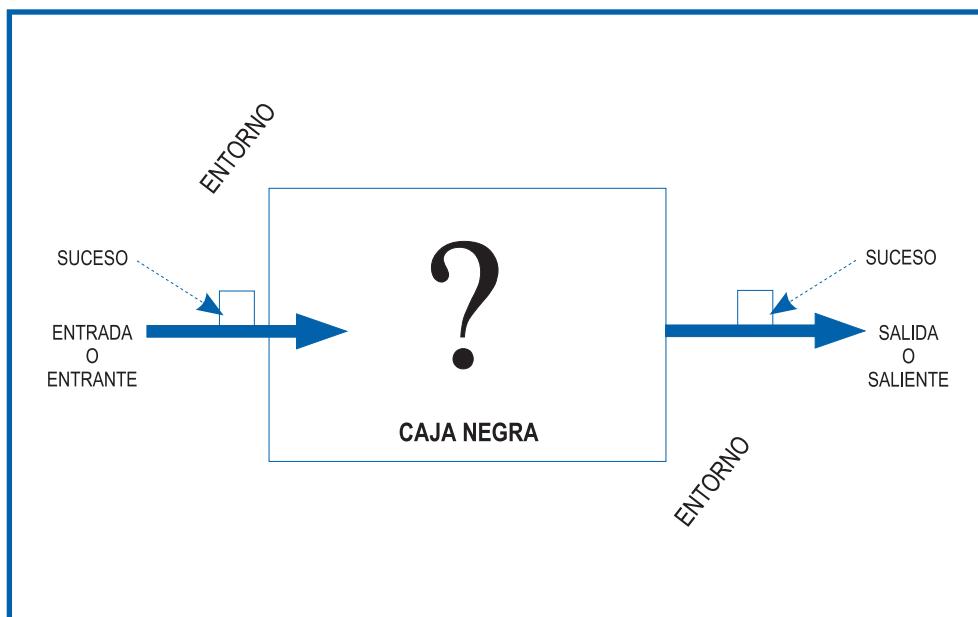


Figura 16. - EL MECANISMO DE LA CAJA NEGRA -

transferencia cuando el objeto actúa como un campo, en tanto que cuando el objeto es procesado por el entorno, sufriendo una alteración de los equilibrios que lo constituyen, recibe el nombre de **mutación o catástrofe**. A efectos de la modelización se supone que los sucesos son producidos por unos procesadores específicos, los **generadores**. Es por medio de estos sucesos como el objeto modifica en todo caso su posición en el tiempo y, eventualmente, en el espacio (transmisión o transporte) y/o en su forma. La percepción de estos cambios se hace a través de procesadores o subsistemas que, dependiendo del grado de evolución del sistema, son más o menos específicos.

Así, encontraremos procesadores del simple paso del tiempo y que podemos identificar con almacenes, en el caso de materia, acumuladores, en el caso de energía, o memorias, en el caso de información.

Un procesador de forma sería, por ejemplo, un filtro, o un proceso de producción en el caso de procesadores de materia, en tanto que

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

un catalizador o un filtro específico serían procesadores de forma de energía y un codificador o un computador jugarían el mismo papel en el caso de información.

Dentro de los procesadores espaciales un extractor o un distribuidor lo serían de materia y/o energía, mientras que una lectora óptica o un canal lo serían de información.

A título de ejemplo consideremos un modelo sistémico del teorema de Pitágoras: la hipotenusa de un triángulo rectángulo es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los catetos:

$$h = \sqrt{(c1)^2 + (c2)^2} \quad (14.1)$$

Desde una perspectiva cartesiana clásica los elementos de este sistema son los valores **c1** y **c2** de los catetos y la hipotenusa **h**, en tanto que las relaciones serían establecidas por los signos **=** y **+**. Pero desde una perspectiva sistémica hay cuatro operadores elementales:

$$()^2, \quad +, \quad =, \quad /$$

estructurados en una red como la mostrada en la Figura 17, que recibe como entradas **c1** y **c2** y tiene como salida **h**, configurándose así un sistema de dos entradas y una sola salida La Figura 17 puede llamar la atención de muchos lectores pero no de los que están familiarizados con los diagramas de bloques de la regulación de sistemas.

La Figura 18 representa un modelo sistémico de la situación planteada entre lobos y conejos en el Capítulo 9. Para alguien que no conozca la dinámica de esta situación el interior del rectángulo, que representa la caja negra del sistema, se hace opaco y lo único que sabe es que para unos valores de entrada **C(0)** y **L(0)** iniciales se produce una salida **C(t)** y **L(t)** en el instante **t**. En esta figura el círculo con su interior blanco representa un operador de multiplicación, en tanto que los que tienen en su interior una constante son, de hecho,

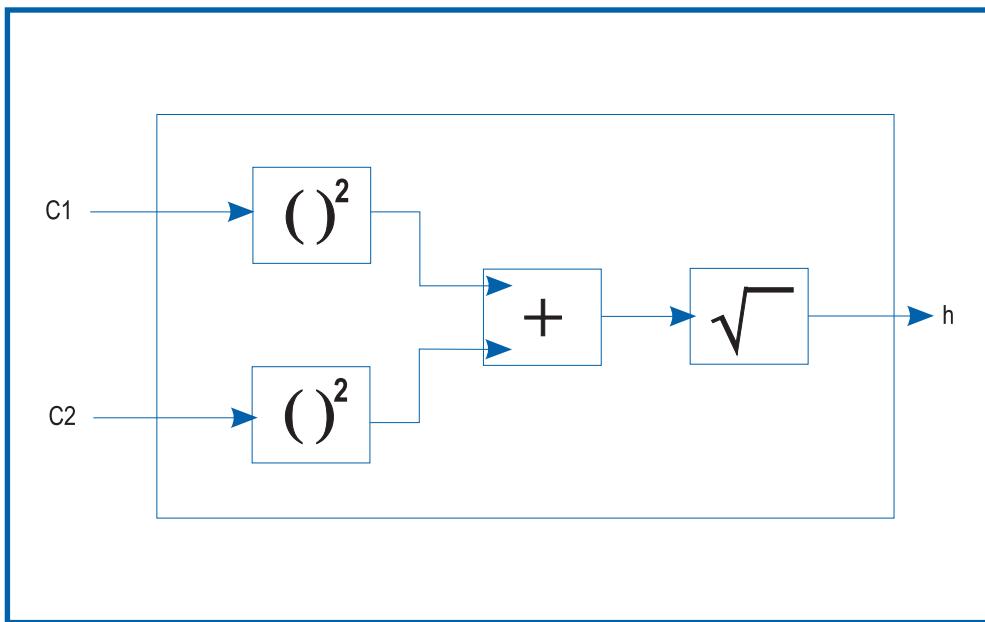


Figura 17. - SISTEMA "TEOREMA DE PITÁGORAS" -

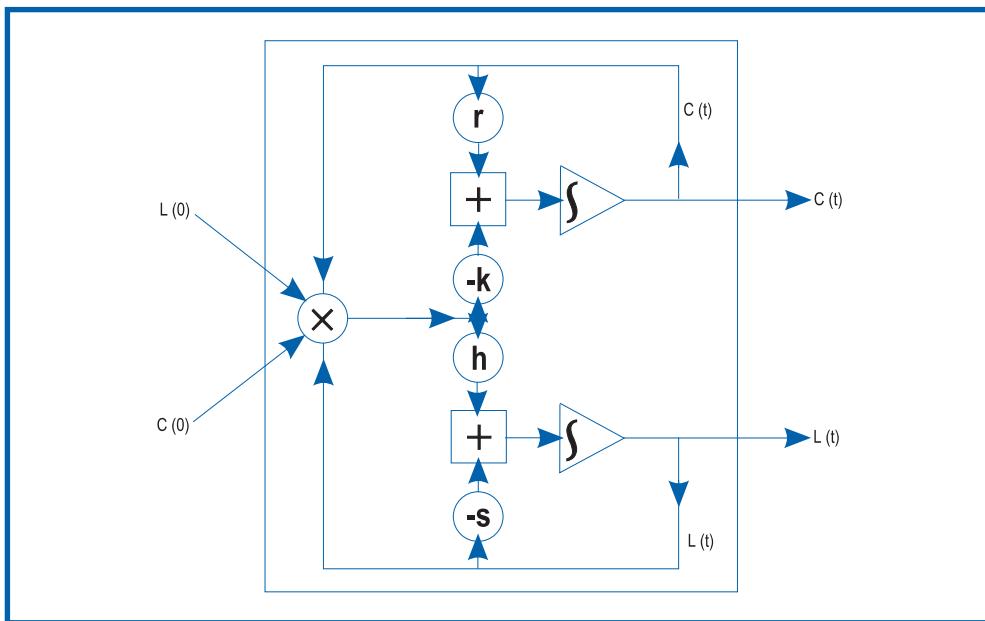


Figura 18. - MODELO SISTÉMICO DEL SISTEMA "LOBOS-CONEJOS" -

amplificadores que multiplican su entrada por el valor de la constante en ellos contenida; los otros dos tipos de operadores son sumadores e integradores. Puede notarse como a partir de una doble entrada, única e instantánea en el instante **t0** inicial, el sistema evoluciona por autorregulación alimentándose de su propia doble salida.

A partir de estos tres tipos básicos de procesadores es posible, a través de un análisis del objeto, ir descubriendo procesadores de naturaleza más sofisticada. Una metodología de análisis es desarrollada por Boulding y Mesarovic, siguiendo la pauta de complejidad creciente sugerida por el mismo Boulding y vista en un Capítulo precedente, que el modelizador debe ir descubriendo en el objeto analizado. Los procesadores de los primeros niveles se encuentran en casi todos los objetos, pero como ya se ha dicho antes a medida que se avanza en niveles de orden superior es más difícil la identificación. Vamos a enumerar estos nueve niveles:

- 1º: El objeto pasivo; el objeto es identificado, ha estado, está y estará.
- 2º: El objeto activo; el objeto opera de forma estable y es a través de esta actividad como nosotros llegamos a conocerle. Se identifican los procesadores de materia y energía.
- 3º: El objeto se regula, rechazando algunos de sus comportamientos posibles. Aparece la realimentación (feedback).
- 4º: El objeto capta información por procesadores de información que se conectan con procesadores de materia y energía.
- 5º: Aparece la capacidad de decisión con sus correspondientes procesadores. Estos procesadores tienen como entrada información y como salida una acción o intervención sobre el entorno según una lógica interna.
- 6º: Va unido de hecho al nivel anterior. La base de la decisión es la comunicación y ésta necesita de una memo-

ria y sus procesadores. En este nivel la trama de relaciones internas del objeto empieza a ser difícil de analizar.

- 7º: Aparecen los procesos de coordinación y control. Esto supone la existencia de un procesador de más alto nivel, al que Mesarovic llama **supremo**, cuya existencia es una hipótesis muy fecunda en el proceso de modelización.
- 8º: Surge la imaginación y la capacidad de autoorganización y de generar información simbólica, a partir de la cual el objeto producirá nuevos comportamientos y nuevas relaciones internas. Surgen los procesos de aprendizaje y la inteligencia, una conexión informacional directa entre el entorno y los procesadores de información.
- 9º: Aparece la conciencia, es decir la capacidad del objeto para engendrar sus propios proyectos de acuerdo con un proceso, generalmente poco conocido y no bien identificado, que es el sistema interno de finalización.

Se suelen considerar también algunos otros subsistemas, tales como el de aprendizaje, dentro del sistema operante, y el de diagnóstico, dentro del de control y en el Capítulo 18 analizaremos un subsistema muy especial, el subsistema logístico. La Figura 19 representa este esquema de modelización por identificación de niveles.

En todo caso, y cualquiera que sea el nivel de jerarquía en que se localice el procesador, contendrá a otros procesadores o subsistemas. El sistema de mayor nivel tendrá características de las que carecen cada uno de sus subsistemas: el todo no es la suma de las partes, es el llamado **principio de la sinergia**. Tal como decía la cantante argentina Nacha Guevara en una de sus canciones (todas las fuentes pueden ser buenas) “tú y yo juntos de la mano por la calle somos mucho más que dos”.

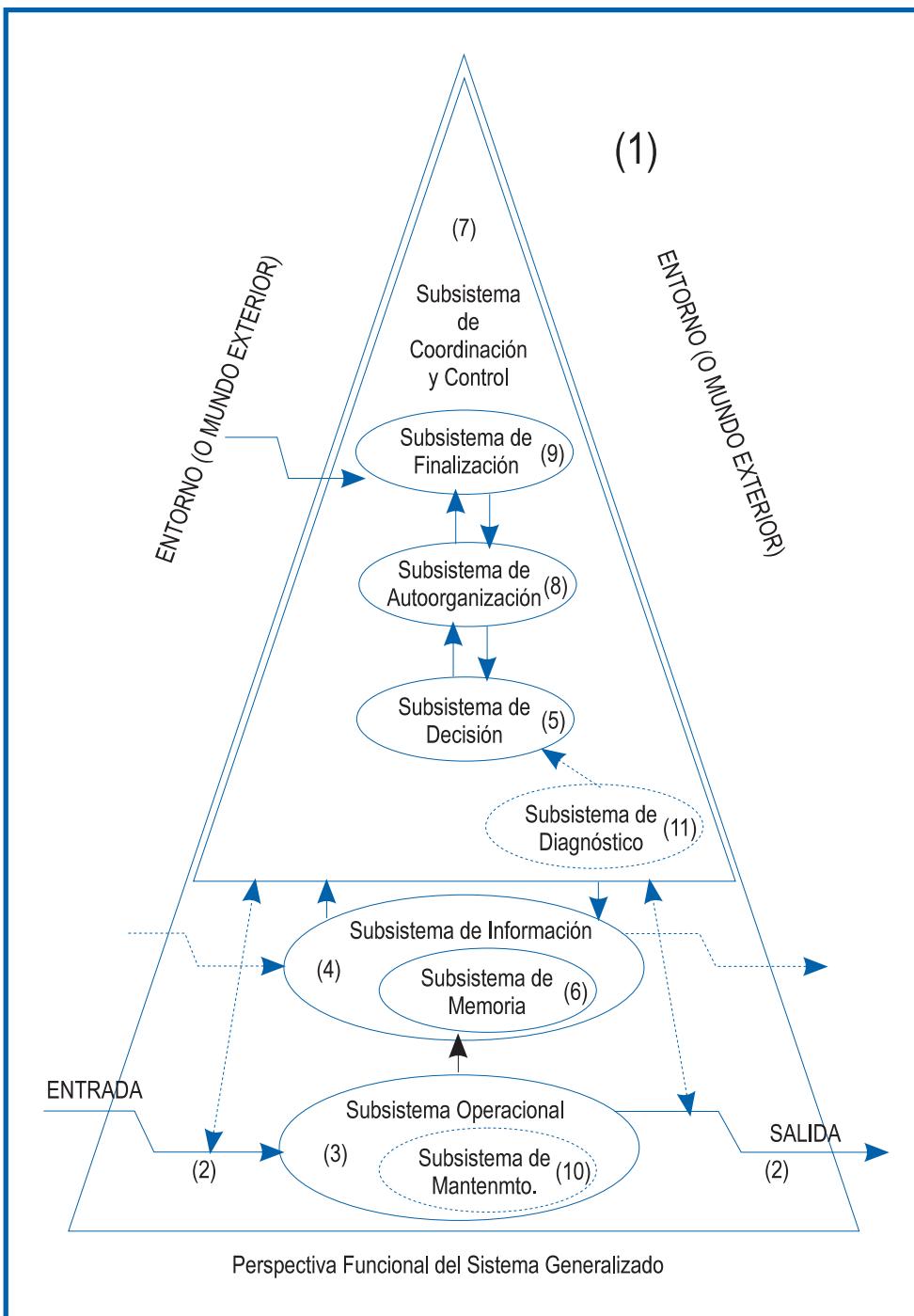


Figura 19. - ESQUEMA DE MODELIZACIÓN POR JERARQUÍA E IDENTIFICACIÓN DE NIVELES -

Pero la modelización no sólo contempla al objeto desde el punto de vista de su actividad, también su estructura es analizada a través de una serie de pares de observaciones temporales de entradas y salidas a los que llamaremos **estados**. Los estados son situaciones susceptibles de ser reconocidas de nuevo si volvieran a manifestarse y conforman lo que se llama el **espacio de estados**. Lo anterior supone la posibilidad de comparar y diferenciar estados y ello implica la existencia de una **estructura** permanente de relaciones entre entradas y salidas que se traducirán en correspondencias que, a veces, serán formalizables matemáticamente. La conducta del objeto estará definida por las transiciones de unos estados a otros y el calendario de esta crónica constituye la **trayectoria o programa** del objeto y su representación se obtiene a partir de la llamada ecuación de estado, por medio de la cual el estado del sistema en un instante **t1** puede ser establecido conociendo su estado en un instante previo **t0** y los valores de las entradas en el intervalo **[t0, t1]**.

Supongamos, por ejemplo, un móvil que tiene en el instante **t0** una velocidad **v0**, que en los intervalos **[t0, t1]**, **[t1, t2]** y **[t2, t3]** es sometido a las aceleraciones constantes **a0**, **a1** y **a2** respectivamente y que en el instante **t3** sufre la aceleración **a3** que permanece en el instante **t > t3**. Las velocidades observadas en el móvil (las salidas del objeto) de acuerdo con estas aceleraciones (las entradas) y la velocidad **v0** (el estado inicial) vienen dadas en la Tabla 4. Nótese que, en nuestro sistema, sólo estamos interesados en lo que se refiere a la relación entre aceleración y velocidad.

Esto nos permite formular la ecuación de estado, es decir, la relación entre aceleraciones (las entradas) y velocidades (las salidas), cuando la aceleración es constante, por la función

$$v(t) = a(t-t_0) + v(t_0) \quad (14.2)$$

De esta forma la ecuación de estado representa la memoria mínima que es preciso conservar del pasado para poder predecir el

TIEMPO	ENTRADA (Aceleración)	SALIDA (Velocidad)
t0	a0	v0
t1	a1	$v1 = a0(t1 - t0) + v0$
t2	a2	$v2 = a1(t2 - t1) + v1$
t3	a3	$v3 = a2(t3 - t2) + v2$

Tabla 4.

comportamiento futuro del sistema. Cuando, como ocurre en el ejemplo anterior, esta ecuación es una función analítica derivable respecto al tiempo, el modelizador dispone de la mejor herramienta para anticipar el estado inmediato en el tiempo del objeto a partir del estado actual y de las entradas que el objeto puede recibir.

Un estado es **mantenible** en un intervalo de tiempo cuando es posible establecer una secuencia de entradas o **controles** en dicho intervalo de tal forma que el sistema permanece en dicho estado. En este caso, y si la ecuación de estados es derivable, su derivada será nula; en el ejemplo anterior bastaría anular la aceleración, pero en este caso aún hay más pues, una vez hecho ésto, el estado es **automantenible**, ésto es, no es necesaria ninguna entrada para que la velocidad del móvil permanezca constante.

Un sistema es **controlable** cuando hay una secuencia de controles que permite pasar de un estado inicial a otro cualquiera en un

tiempo dado, y es **observable** cuando es posible identificar el estado inicial a partir del estado actual y de la secuencia de controles aplicada durante el intervalo de tiempo transcurrido. Nuestro sistema aceleración-velocidad es controlable y observable.

La imagen de una estructura funcionando en el tiempo conduce de forma natural a la idea de **organización**: la suma de una estructura más un programa conectados a través de una memoria o, por ser respetuosos con nuestra propia terminología, de un procesador de memorización. Una imagen familiar de este esquema es el de un lavavajillas: en este electrodoméstico el espacio de estado reconocido por sus elementos móviles (aspas, contenedor de detergente, etc.,..) tiene discontinuidades cuantitativas y cualitativas (mojar, calentar, enjuagar, centrifugar) que se alcanzan a través de unos cambios asegurados en el tiempo y en los momentos adecuados por una banda-programa que, a su vez, es movida por el lavaplatos. Por cierto, que el lavaplatos-musa que me estaba inspirando este ejemplo acaba de experimentar una catástrofe, en la doble acepción que a esta palabra le dan René Thom y mi vecino, que es ebanista.

La identificación de una organización en un sistema supone por un lado la de una red de comunicaciones, que conecta los procesadores de memorización con los operantes (los decodificadores, transductores, captores, procesadores de mantenimiento o logísticos, etc,... de los ingenieros de Automática y Control) y decisionales y, por otra parte la existencia de un subsistema de control y regulación.

Titli sugiere, en relación con este último, la siguiente metodología para diseñar un buen sistema de control sobre un sistema operante:

- a) Dividir el sistema de control global en subsistemas más simples formando una jerarquía.
- b) Dividir el proceso a controlar en subprocesos gobernados se-

gún criterios locales por los niveles superiores de la jerarquía, en cuya cima está el procesador al que Mesarovic llama supremo.

- c) Para garantizar la eficacia del sistema de control y de los procesadores decisionales que lo utilicen, la memoria debe ser común, de forma que todos los procesadores decisionales (los responsables de adoptar las decisiones, vamos) de un mismo nivel tengan acceso al mismo almacenamiento de memoria y a los de los niveles inferiores.

Esta filosofía coincide de pleno con todas las teorías actuales sobre la organización de empresas y los sistemas de información y permite la aproximación a uno de los objetivos fundamentales de la modelización sistémica: **convertir los sistemas complicados en complejos**, es decir, sistemas con almacenamientos de memoria no compartidos, funciones de un cierto procesador desconocidas o conocidas parcialmente por otros procesadores, criterios y objetivos parciales no coordinados, redes de comunicación arborescentes, etc.,.. en sistemas con una jerarquía de criterios y fines compartidos y redes de comunicación sencillas y accesibles al nivel de cada procesador.

En la práctica ésto se traduce por un lado en la conveniencia de que los individuos en las organizaciones consigan un equilibrio entre una especialización necesaria y una visión generalista deseable, y por otro en la necesidad de que los fines y objetivos de la organización sean conocidos y aceptados por sus miembros.

Pero sigamos con el proceso de modelización interna del objeto. Una organización no puede ser interpretada sino en relación con los fines y proyectos del sistema; por eso controlar un sistema organizado no consiste en activar sus estructuras, sino en gestionar sus proyectos a lo largo del tiempo, de forma que la organización del sistema no sólo le permite transformarse, comunicarse, mantenerse, producir, etc,... sino también auto-organizarse, definiendo unas **me-**

didas de ejecución que permitan evaluar el grado en que los objetivos y fines son conseguidos.

Por último, y en cuanto a las formas estables de estructuración de un objeto, podemos considerar cuatro situaciones básicas:

- a) En la primera se percibe al objeto como estable, dotado de proyectos estables y en un entorno estable. Es la fase de **regulación**. Para alcanzarla es necesaria la existencia de una conexión de realimentación entre las salidas y las entradas, aunque existen otros dispositivos de regulación, como por ejemplo, la eliminación de perturbaciones por diferentes “mecanismos de defensa” del sistema (es lo que hacen los glóbulos blancos al atacar a microorganismos invasores).
- b) La segunda situación es aquella en la que el sistema se encuentra con relaciones con su entorno que no había programado. La creación de programas que, incorporados a la memoria, permiten asimilar estas relaciones se conoce como **adaptación por programas**, dando lugar así a la aparición de comportamientos de tipo automático. A este tipo de situaciones pertenecen también las conocidas como **adaptación por aprendizaje**.
- c) La tercera situación se presenta cuando el objeto, capaz de regularse y adaptarse, modifica sus proyectos que, al igual que el entorno, permanecían estables en las dos situaciones anteriores. Esto supone que el sistema es un sistema abierto y el tener en cuenta los nuevos proyectos requiere seguramente una adaptación estructural.
- d) Por último, cuando el entorno y los proyectos son cambiantes, el objeto alcanza su estabilidad a través, no de un mero cambio de estructuras, sino de una completa evolución morfogenética: es la **equilibración**.

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

En el último párrafo aparece ya el término evolución como una forma de expresar un cambio en las finalidades del sistema. Estos cambios acarrean a su vez un cambio en los estados de equilibrio que toda estructura representa. Para describir la historia de estos equilibrios los termodinámicos introdujeron en el siglo XIX el concepto de **función de estado**. Esta función describe así la dinámica del sistema, de la misma forma que la ecuación de estado describía su cinemática. La función de estado explica la “conducta” de un sistema que cambia de estructura para mantener su identidad. Esto es lo que hacen aquellos sistemas que están situados en los niveles superiores de la escala de Boulding: cambian su forma, pero preservan su identidad. “La Variedad”, un poema de F. Schiller, recoge este hecho:

*Triste es el imperio del concepto: con mil formas cambiantes,
pobre y vacío, no fabrica más que una.*

*Pero la vida y la alegría exultan allí donde la belleza reina;
El Uno eterno reaparece bajo mil formas.*

Esta función de estado debe dar una medida de la “riqueza” y variedad del sistema y no es otra que la que en otro Capítulo llamamos **entropía**. La consideración de esta función fue la que nos permitió una clasificación fundamental de los sistemas en abiertos y cerrados, como ejemplos de dos formas de evolución.

Los sistemas cerrados evolucionaban hacia una uniformización de estructuras, reduciéndose la variedad y creciendo la entropía; los sistemas abiertos, de acuerdo con la generalización del concepto de entropía de Prigogine, mediante importación o exportación de entropía, es decir, a través de intercambios con su entorno, pueden empobrecer, enriquecer o estabilizar su variedad. La capacidad para aumentar su variedad, y por tanto reducir su entropía, está en relación con la capacidad del sistema para sacar partido, a base de enriquecer su organización, de sucesos no programados generados en el entorno; esta capacidad implica que el sistema, por medio de procesadores

muy específicos, acepte y asimile el suceso, no filtrando en exceso las perturbaciones que pueda originar. Todo el enriquecimiento de una organización por aprendizaje es interpretado en esta línea. Pero además hay otra forma de disminuir la entropía, y es que el propio sistema se autoperturbe, generando alternativas estructurales y de finalización, es decir, la posibilidad de que varios y diferentes procesadores puedan realizar idénticos procesos en ocasiones de forma distinta. Esto es lo que, en el terreno de la política, se conoce como democracia y algún ejemplo de esta estructura se puede encontrar por ahí. con algo de suerte, aunque no conviene hacerse ilusiones A esta característica la llamaremos **redundancia** (como bien se sabe, los idiomas más ricos de expresión tienen una alta redundancia, en tanto que los lenguajes de programación, por ejemplo, la tienen muy baja).

La asimilación de las perturbaciones sin que la identidad del objeto se pierda, es decir sin que se produzca una catástrofe, requiere la aparición y diferenciación de nuevos procesadores y estructuras en los subsistemas que permitan el desarrollo de nuevas actividades y la posibilidad de nuevos proyectos y, al mismo tiempo, un incremento en la coordinación de funciones. Cuanto más especializadas estén las partes tanto más necesaria es la coordinación para formar un todo equilibrado.

La experiencia de los sistemas sociales ha demostrado que las organizaciones no pueden ser abandonadas a una evolución azarosa. La evolución debe ser concebida y construida. Por eso al describir un Sistema Generalizado es preciso referirse tanto a la lógica de su organización como a la de su evolución.

De nuevo los conceptos de sistemas complicados (o fríos) y complejos (o calientes) vienen a servir de ejemplo de los dos tipos extremos de evolución. Desde la perspectiva de la evolución un sistema es complejo cuando la diversidad de sus actividades y funciones no supone necesariamente una diversidad proporcional en sus procesadores: si tiene menos procesadores que funciones es porque

la red que los conecta está fuertemente integrada y muestra numerosos bucles de realimentación, que permiten que los procesadores sean multifuncionales.

Por el contrario un sistema es complicado cuando una gran diversidad de procesadores no implica el mismo grado de diversidad en sus funciones y su red de conexiones está poco integrada, presentándose por lo general en forma de árbol. Son sistemas con un único origen y un único proyecto, y su evolución se produce por vía de **reproducción**, un fenómeno de carácter informacional que genera una corriente continua y ramificada de generaciones de procesadores, que no supone la aparición de réplicas idénticas en cuanto a las funciones a realizar, de hecho puede haber gran diferenciación, pero sí en cuanto a la capacidad del sistema para preservar su relación con el entorno y en comportarse como si su meta única fuera la preservación de esa integridad, de forma que en muchos casos y a la manera de un cáncer, el objeto acaba con el sistema del que forma parte o irrumpir como una catástrofe en el entorno.

Un sistema frío no es malo en sí mismo. En principio, la burocracia, ejemplo arquetípico de este tipo de sistemas, es algo necesario y puede ser bueno y útil para un sistema de superior jerarquía, pero la experiencia demuestra que para los sistemas fríos hay un umbral más allá del cual las leyes de evolución auto-organizada de estos sistemas pierden su validez. El modelizador, o el procesador de máximo nivel de un tal sistema, que no percibe este umbral de transición de un sistema complicado-frío a uno complejo-caliente está abocado a muchos disgustos o, como apunta Le Moigne, se convierte en un tecnócrata peligroso.

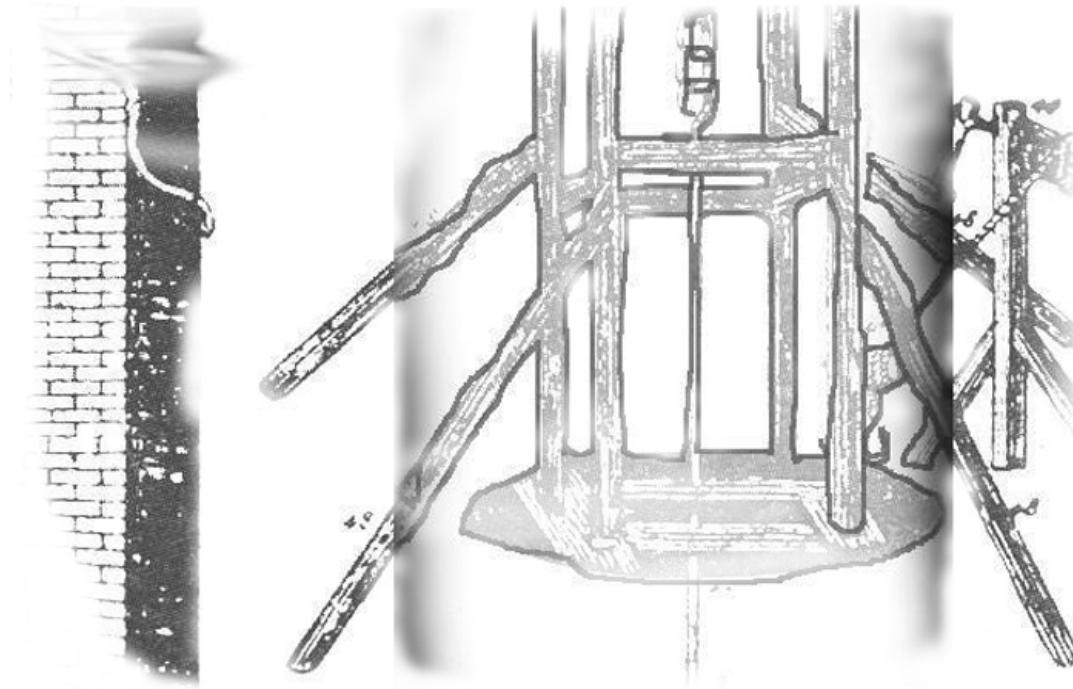
Lo siento, pero tengo que ponerle deberes otra vez. Haga un esfuerzo y elabore un modelo sistémico del crecimiento de la población gobernado por un caso particular de la fórmula (6.7):

$$x'(t) = ax(t) - tx(t)^2 \quad (14.3)$$



15

El análisis sistémico, la simulación y el diseño



Ante todo le doy (ver Figura 20) una posible solución al problema que le planteé al final del epígrafe anterior. Es un sistema con una entrada inicial $x(0)$, luego una entrada de interacción con el entorno dada por la función $h(t) = t$, una realimentación interna y una sola salida.

Como ya hemos indicado, cuando nos enfrentamos a la tarea de modelar un objeto, los fines del modelizador, que es el sistema de representación, jugarán un papel clave en el tipo de modelo propuesto. De hecho, podemos considerar, aunque es posible establecer otras tipologías, que hay tres tipos de objetivos cara a la modelización cuya metodología de aplicación se muestra en la Figura 21.

a) **Analizar**, desde una perspectiva sistémica, el objeto; para este fin, comenzaríamos estudiando las funciones desarrolladas (1) y la evolución seguida (2) por el objeto, observadas en un entorno (3), de manera que, interpretándolas a la luz de unos fines del objeto(4), conocidos o supuestos, sea posible inducir una estructura (5) compatible con lo observado. Este análisis sistémico es diferente de la acepción clásica del término análisis, que hace más bien referencia al proceso de disección de un objeto real en sus partes y, en el mejor de los casos, de las relaciones entre ellas.

El proceso de análisis sistémico, conocido en la jerga de la Sistémica como metodología “top-down”, descompone el sistema originalmente percibido en sucesivos y cada vez más sim-

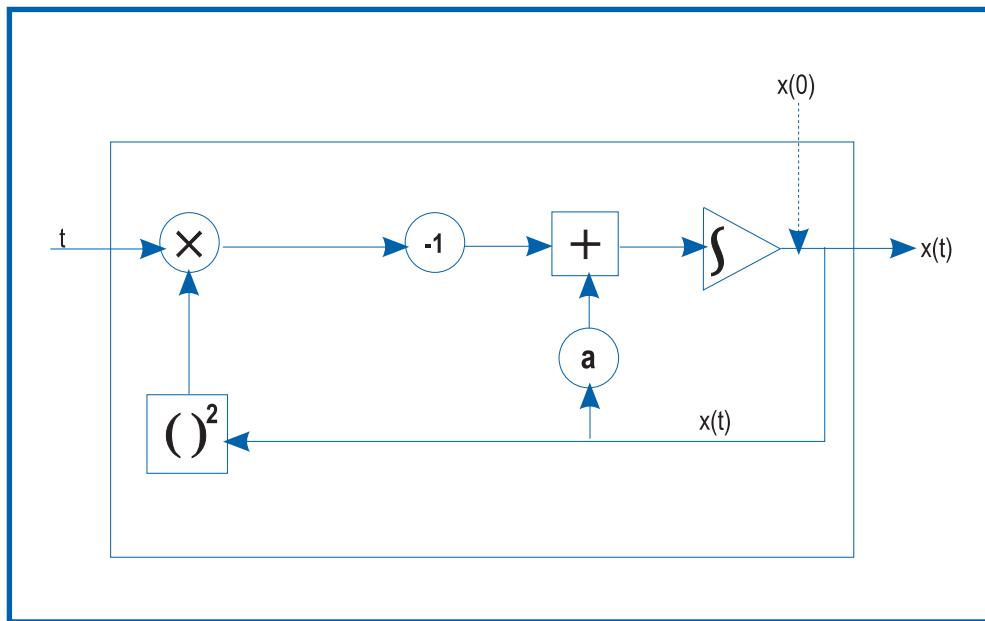
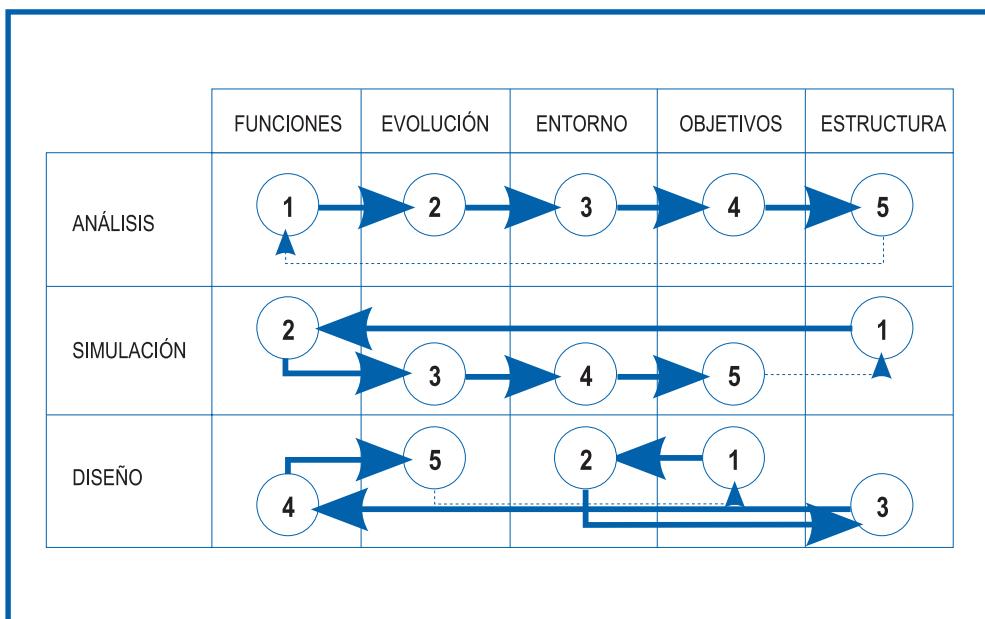
Figura 20. - EL SISTEMA $x'(t) = ax(t) - tx^2(t)$ -

Figura 21. - ESQUEMA DEL ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y DISEÑO SISTÉMICOS -

plexos subsistemas o procesadores, hasta un nivel en el que puedan ser perfectamente identificados en su actividad, estructura, función, evolución y finalidad. A partir de ese momento comienza un proceso de síntesis de estos subsistemas básicos, que son integrados en otros subsistemas más complejos, pero ya reconocibles, hasta llegar a reconstruir el sistema original, que ahora ya es percibido en su triple dimensión de una forma más perfecta: este proceso de síntesis funciona de acuerdo con otra metodología muy conocida, aunque no muy utilizada en la Sistémica, llamada “bottom-up”.

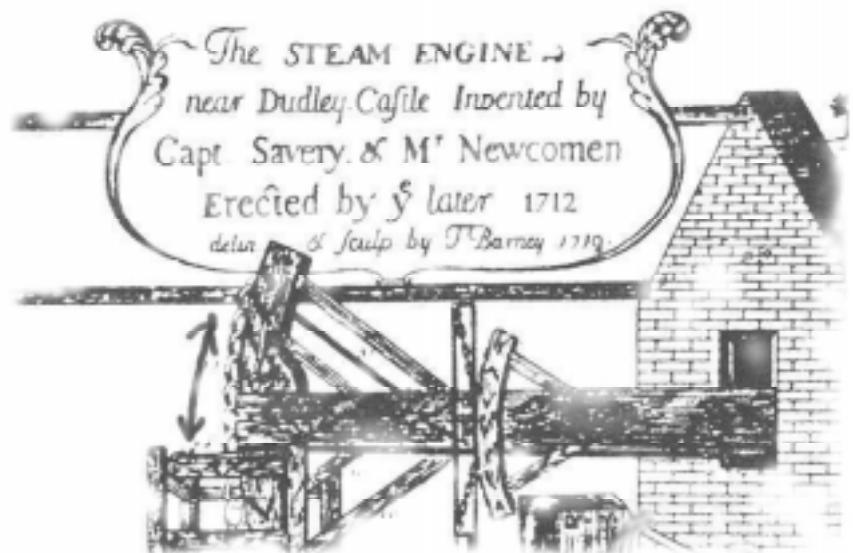
- b) En el caso de una **simulación** se parte de una estructura (1), obtenida previamente por análisis o diseño. Se hace funcionar (2) esta estructura y se observa su evolución (3) en un entorno dado (4) para comparar el resultado de este proceso con unos fines u objetivos (5) prefijados. Si la comparación, de acuerdo con algún criterio (económico, de ejecución, de calidad, etc.,..), no resulta satisfactoria se procede a rediseñar o a reanalisar la estructura o a alterar la frontera con el entorno y el proceso comienza de nuevo.
- c) Para **diseñar** un modelo el punto de partida es la identificación de los proyectos y objetivos (1) del objeto que han de alcanzarse en un entorno o condiciones prefijados (2). Para ello se propone o diseña una estructura (3) que se hace funcionar (4) y evolucionar (5) para, al igual que ocurría con la simulación, comparar los resultados y el estado final de la evolución sufrida por el objeto modelizado con los objetivos propuestos. La medida de esta comparación se conoce como la **fiabilidad** del diseño y, en caso de no resultar satisfactoria, se modifica la estructura diseñada inicialmente y se vuelve a los pasos (4) y (5).

El proceso de diseño o concepción contempla tres niveles de estudio, dentro también de la metodología “top-down”:

- el nivel lógico o superior, en el que se establecen los niveles de jerarquía de los distintos procesadores,
- el nivel funcional o medio, en el que se determinan las interrelaciones entre los diferentes procesadores que explican el funcionamiento del sistema orientado a los fines propuestos,
- el nivel físico o inferior en que se procede a la implantación real de procesadores ya conocidos que garanticen que el sistema puede alcanzar sus objetivos en una medida adecuada.

16

La dinámica de sistemas: un método eficaz de representación



Hay muchas formas de modelar la red de relaciones entre los diferentes procesadores de un sistema. La más conocida es sin duda la llamada **dinámica de sistemas**, desarrollada en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) en los años cincuenta y presentada por J.W. Forrester en su célebre “Industrial Dynamics” [4]. Su fama es debida tanto a su eficacia como al hecho de haber servido de referencia para otras metodologías de modelización y simulación (método HOCUS de simulación, System Thinking, etc,...).

De acuerdo con esta metodología es siempre posible representar cualquier proceso de tipo flujo, no importa cual sea la naturaleza de éste, por medio de una red o grafo cuyos nodos o vértices son procesadores elementales y cuyos arcos representan las conexiones e interrelaciones que aseguran los flujos entre los diferentes procesadores que garantizan que el sistema sea activo y que sus diferentes subsistemas evolucionen simultáneamente. Como rasgos característicos presenta los siguientes:

- a) Modela mediante bucles de realimentación el hecho de que la evolución del sistema puede depender en mayor o menor medida del propio estado del sistema.
 - b) Modela también aquellas situaciones en las que existen retrasos entre las acciones y reacciones de los diferentes procesadores del sistema, situación que se presenta cuando la captación, por observación o medida, de la evolución del sistema
-

ma puede sufrir retrasos respecto al instante en el que se produce la evolución.

- c) Puede modelizar también relaciones entre subsistemas y procesadores de naturaleza no lineal.

La materialización de esta metodología es conocida como **diagrama de Forrester**. Sin extenderme en la descripción de estos diagramas de tipo causal, labor que en otra monografía de esta serie desarrolla con mucho mayor conocimiento y autoridad que yo, el profesor Javier Aracil, conviene saber que en ellos los diferentes procesadores son representados por tres tipos de variables: **de nivel, de flujo y auxiliares**.

Las variables de nivel proporcionan información acerca del estado del sistema; son aquellas variables significativas para estudiar el sistema. Las hay de dos tipos: los **niveles** propiamente dichos o **depósitos**, que son procesadores de tipo T, y las **nubes**, que representan una **fuente**, o nivel inagotable, o un **sumidero**.

Las variables de flujo, que son procesadores de los tipos E o F, alteran y establecen, a través de acciones determinadas desencadenadas por informaciones específicas, los valores de las variables de nivel. La relación entre información y acción se establece a través de las llamadas ecuaciones de flujo o funciones de decisión. La información de entrada es una variable de nivel o una variable auxiliar, que puede ser interna o externa al sistema; la salida es una decisión que supone una acción específica para alterar un nivel a través de una canal de transmisión de materia o energía.

Las variables auxiliares son etapas en el cálculo de los flujos y niveles, alimentando los canales de información entre ellos. Aunque en si mismas no tienen significado real ni aportan información esencial sobre el sistema, facilitan la comprensión de las ecuaciones de flujo que resumen la dinámica del modelo.

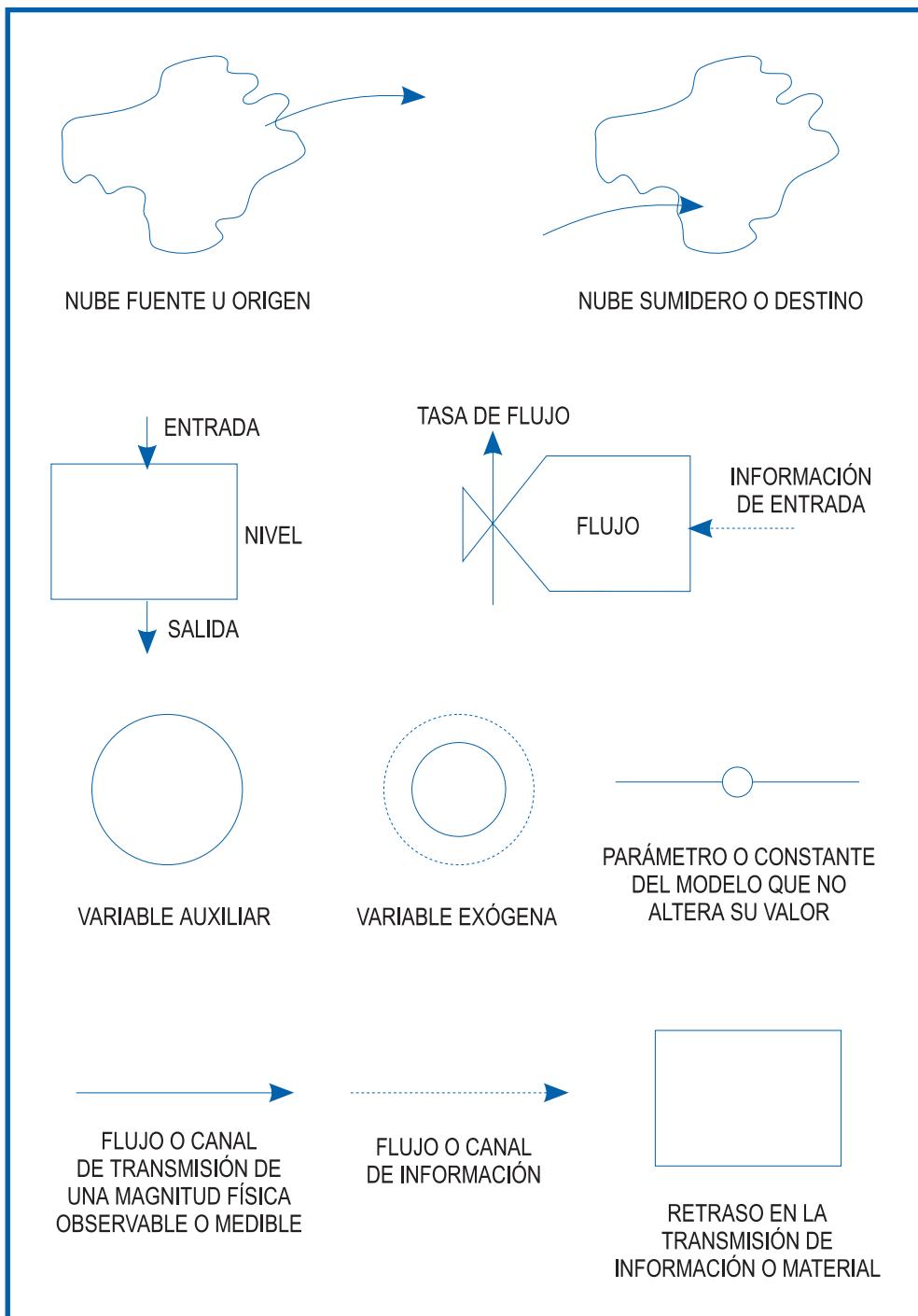


Figura 22. - SÍMBOLOS TÍPICOS DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS -

La dinámica de sistemas: un método eficaz de representación

En la Figura 22 se representan los símbolos de los diferentes elementos utilizados en un diagrama de Forrester, en tanto que la Figura 23 es un diagrama elemental del funcionamiento de un almacén, en el que puede observarse como el nivel inventario surge de la diferencia del flujo de recepciones y del flujo de salidas.

Más deberes. Sobrepongase al agotamiento e intente modelizar desde el punto de vista de la **dinámica de sistemas** el problema de los lobos y conejos.

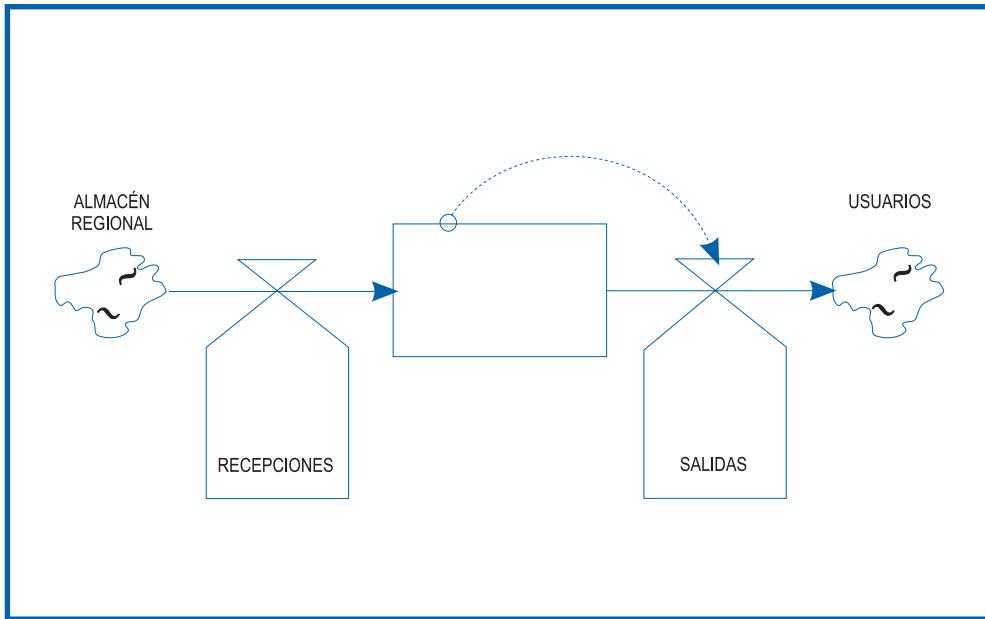
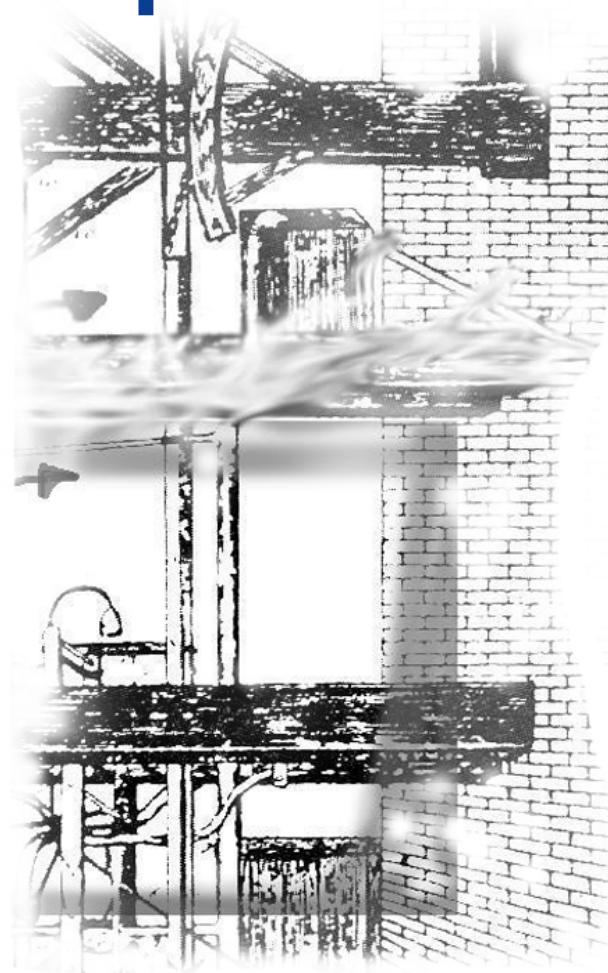


Figura 23. - MODELO ELEMENTAL DE UN ALMACÉN -

17

El sistema "Empresa"



Bueno, no irá a decirme que estaba esperando la solución a los deberes. Si usted ha llegado a estas alturas de la monografía es que ya es un converso a la sistémica y entonces tengo que animarle a perseverar con sólo sus propias fuerzas en la búsqueda de una solución. ¡Ánimo!

Si existe algún campo de la actividad humana donde la perspectiva sistémica se muestre como la más eficaz y adecuada herramienta de modelización es en el ámbito empresarial. Dentro de él es posible identificar con mayor facilidad los diferentes niveles de complejidad de la tipología de Boulding, que constituyen las pautas de identificación de las características de un sistema que Le Moigne propone como guía en el proceso de modelización. La empresa de producción, perfectamente delimitada de su entorno, con el que interacciona, es un ejemplo típico de sistema abierto, en el que los diferentes tipos de procesadores, operativos, informacionales y decisionales son fácilmente reconocibles, en el que la jerarquía de subsistemas está perfectamente diseñada (no es difícil en este caso reconocer el procesador supremo, el consejo de administración) y en el que los flujos de realimentación, sean informacionales, energéticos o financieros, sean internos o externos, y las entradas y salidas de cada subsistema, y las del sistema globalmente considerado, están bien definidos.

Para todo aquel que tenga cierto conocimiento y experiencia de la vida de una empresa será fácil encontrar las equivalencias entre las

denominaciones habituales de los diferentes y clásicos departamentos de una empresa de producción y las que corresponden al argot específico de la Teoría General de Sistemas.

La Figura 24 puede ser un modelo esquemático simplificado de una empresa (exactamente PIRULETAS, S.L.) en el que se muestran algunos subsistemas básicos (departamentos) distribuidos en cuatro niveles artificiales, que no se corresponden en cuanto a su número de orden pero sí en cuanto a su jerarquía con el esquema de Boulding, ordenados de acuerdo con la menor o mayor capacidad de decisión y finalización asociada a cada uno de ellos.

Aunque las entradas a un procesador pueden ser de una cierta naturaleza y sus salidas de otra muy diferente (se da el nombre de **capacidad** o “throughput” a lo que entra en un sistema de una forma y sale de otra), se puede suponer que las entradas y salidas de este sistema y de cada uno de sus subsistemas pueden ser traducidas a

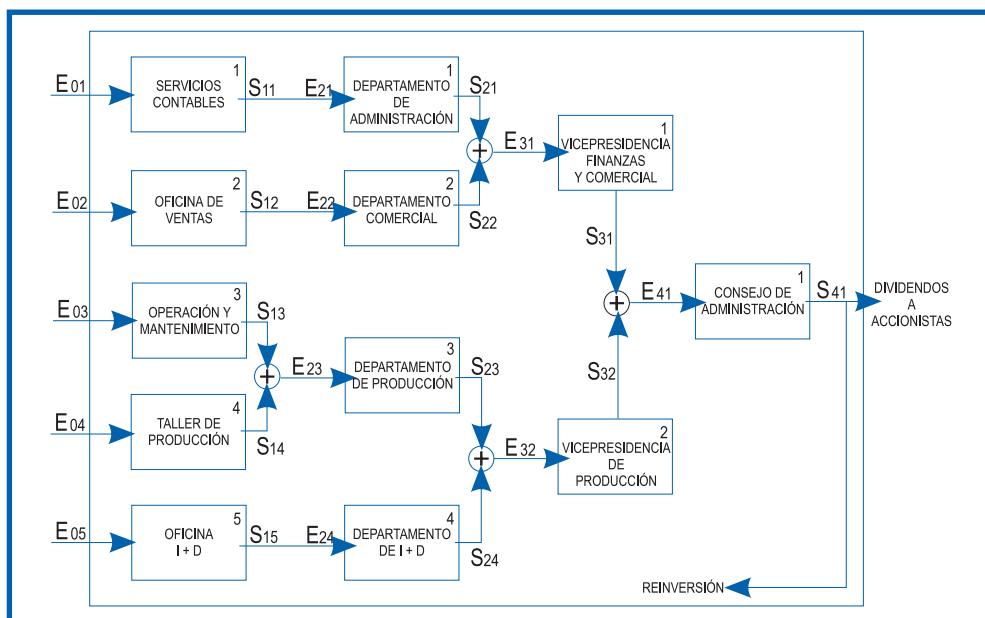


Figura 24. - MODELO ESQUEMÁTICO DE PIRULETAS, S.A. -

unidades monetarias, de forma que cada departamento convierte el valor de sus entradas en el valor de sus salidas, es decir, si $E(i)$ y $S(i)$ son las entradas y salidas totales del i -simo departamento se tendrá que $S(i)$ es una función específica de $E(i)$, actuando así, es de esperar, como ciertos procesadores bien conocidos por los ingenieros electrónicos con el nombre de amplificadores, de manera que, conocidas estas funciones de amplificación, es posible conocer cual va a ser la salida del sistema “Empresa” (es decir, los dividendos) conocidas sus entradas, siempre y cuando el entorno permanezca estable.

Me voy ahora a permitir exponer un ejemplo, sugerido en el fondo y en gran parte de su forma por la lectura de unos apuntes de clase de mi colega Pedro Jiménez [5], de realimentación interna en PIRULETAS, S.L., empresa que supondremos está en su tercera generación, es decir, la creó el abuelo (que pasó de vender pirulíes en el parque del Retiro a niñeras, soldados sin graduación y niños en edad del biberón, a fabricar todo tipo de esas chucherías por las que en alguna fase de nuestra vida, y no digo que no sea la presente, todos nos hemos perecido y que son precursoras de los establecimientos de “comidas rápidas”), luego continuó llevándola prósperamente, aunque sin mayores iniciativas, su único hijo (con tanto trabajo el abuelo no tuvo tiempo para más) que, junto con los miembros de la tercera generación, su hija Krimigilda y sus tres hijos Gesaleico, Amalarico y Recesvinto, son los actuales dueños aunque el presidente del Consejo de Administración es su yerno Pepe, hombre bastante preparado y que, a pesar de sus tres cuñados y de su mujer, mantiene la empresa a flote. Nos encontramos a toda la familia cenando y la tierna Krimigilda acaba de sugerir a su marido la posibilidad de que el puesto de Jefe del Departamento de I+D, que está vacante porque su anterior responsable decidió pasar a la Universidad en la creencia de que allí su sueldo sería mayor (no se rían, por favor, esto es muy serio), lo ocupe su hermano pequeño Recesvinto que, a sus cuarenta años recién cumplidos, acaba de obtener el título de Bachiller en Ingeniería de Mondas de Papas en la prestigiosa

universidad norteamericana de Coyote City, clasificada en el ranking de 2500 instituciones de enseñanza superior que hay en USA en segundo lugar según se empieza por abajo, que es por donde se la localiza antes, y en la que ya han cursado profundos estudios sobre las costumbres de las ardillas y similares tantos conocidos vástagos de nuestra sociedad de papanatas.

Tras recuperarse del amago de infarto de miocardio que le ha producido la propuesta de su mujer, nuestro héroe se aplica a la tarea de dar satisfacción a su familia política y a la vez patrona. El problema es que ya tuvo que resolver dos situaciones similares con las otras dos lumbreras familiares inspirándose en los estudios de L.J. Peter: así, a Gesaleico le aplicó una “sublimación percuciente” en virtud de la cual le nombró Asesor Máximo del Presidente para Análisis de Pruebas Tipográficas, con lo cual lo tiene cerca de sí, haciendo nada a toda velocidad y sin causar más problemas que los derivados de su propia e inevitable presencia; Amalarico por su parte fue objeto de un “arabesco lateral” que le convirtió en Jefe del Departamento de Supervisión de Segundas Copias de Procesos Informáticos, al frente de una cuadrilla de incompetentes que han sufrido el mismo tipo de desplazamiento y que la empresa no sabe como quitarse de encima, pero que salvo sueldos y papel, no causan mayores dificultades. Sospecha que aplicar al tercero de la dinastía una terapia similar le puede ocasionar problemas familiares y profesionales, por lo que aprovecha sus lecturas sobre la Teoría General de Sistemas para, accediendo a la propuesta familiar nombrar a Recesvinto Jefe de I+D de la empresa, al tiempo que crea un pequeño centro de estudios cuidadosamente diseñado y con un personal de alta cualificación que, fuera de la jurisdicción de su cuñado, utilizará la salida del Departamento de I+D para aumentar la eficacia del Departamento de Producción.

A costa de un pequeño incremento en los gastos, Pepe ha evitado, gracias a un esquema de realimentación como el representado en la Figura 25, evitar la catástrofe de la ganancia nula, quizás

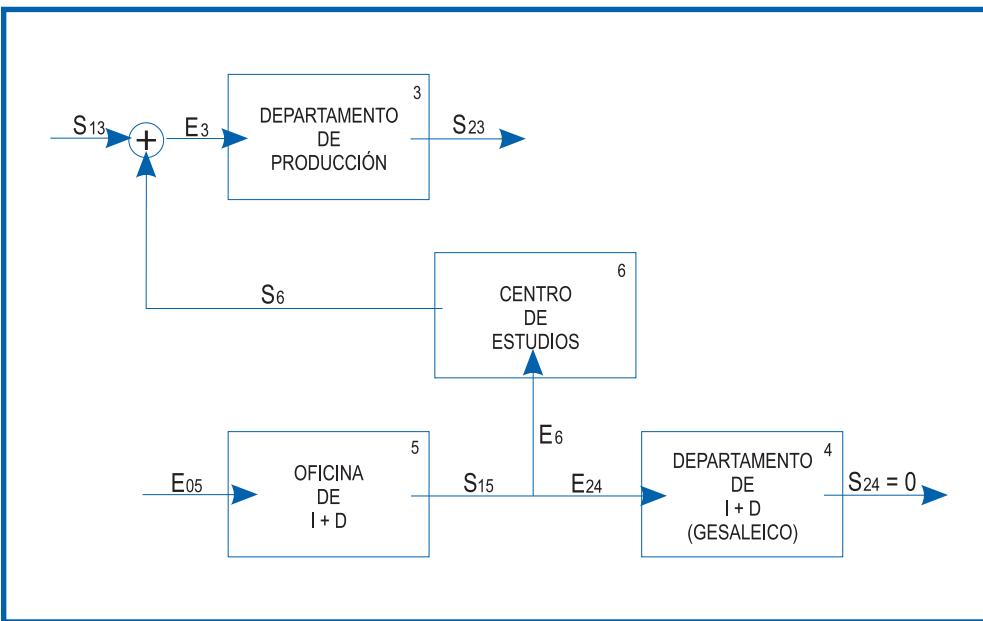
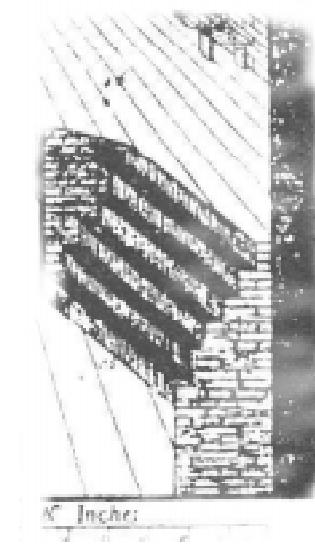


Figura 25. - EJEMPLO DE REALIMENTACIÓN Y ELIMINACIÓN DE PERTURBACIONES -

negativa, que hubiera supuesto dejar a Recesvinto, del que sospecha carece de capacidad alguna como “amplificador” la responsabilidad de aprovechar la salida del Departamento de I+D.

18

La logística: una visión sistémica del ciclo de vida de un producto o un sistema



La logística ha sido vista durante mucho tiempo desde una perspectiva marcadamente militar. De ahí que la enciclopedia todavía la defina como

“una parte de la ciencia militar que calcula, prepara y realiza cuanto se refiere a la vida, movimientos y necesidades de las tropas en campaña, a fin de conseguir la máxima eficacia de una operación”.

Posteriormente los sectores industrial y comercial se apoderaron del término, adjetivándole ocasionalmente como logística empresarial o logística industrial, y adoptando como definición la siguiente [6]:

“Es la planificación, organización y control del conjunto de actividades de almacenamiento y movimiento y que facilitan el flujo de materiales y productos desde la fuente al consumo, para satisfacer la demanda al menor coste, incluidos los flujos de información y control”.

Pero esta definición, al estar centrada fundamentalmente centrada en las áreas de la producción y la distribución, es también una visión parcial, aunque encierra el germen que desde la perspectiva de la Teoría General de Sistemas se le da a esta palabra. En la actualidad ambas interpretaciones han quedado cortas y demasiado limitadas. La empresa moderna, sea cual sea el sector de actividad al que se dedique y la naturaleza de sus productos, se estructura como un sistema que concibe a su entorno como otro sistema con el que, en cierta medida, tiene objetivos comunes que conjuntamente tratarán de

alcanzar de forma que cada uno pueda, al mismo tiempo, satisfacer objetivos particulares. Esta percepción del entorno es la que ha dado a las empresas japonesas su enorme competitividad al conseguir que sus flujos de todo tipo, tanto los internos (políticas “justo a tiempo”, “kanban”, “stock cero”, etc, etc,...) como los que la comunican con el exterior (distribución, transporte, servicio post-venta,etc,), no tengan “atascos”. Por otra parte la evolución tecnológica y social, las cada vez mayores interacciones económicas y competitividad de los mercados y, como consecuencia, las también cada vez más frecuentes crisis de la economía mundial, han hecho que el concepto de la logística no se limite ya a garantizar el funcionamiento de un sistema o el ciclo de vida de un producto hasta llegar al consumidor, sino que asume también la identificación de las necesidades que, de forma natural o provocada, se generan en el entorno y todo el proceso de diseño/concepción de las soluciones a dichas necesidades, proceso que a su vez es integrado con las actividades contempladas en las dos definiciones anteriores.

La logística se configura así como la integración de muchas actividades y elementos y pasa a jugar un papel significativo en todas las fases del ciclo de vida de un producto o de un sistema, sistema que puede ser la propia empresa. Por ello la **Society of Logistics Engineers (SOLE)**, que está extendida a través de sus diferentes capítulos por todo el mundo, ha dado la siguiente ampliada definición de la logística:

“El arte y la ciencia de las actividades técnicas, de gestión e ingeniería relacionadas con las necesidades y recursos de diseño, aprovisionamiento y mantenimiento necesarios para alcanzar objetivos, desarrollar planes y servir de soporte a operaciones”.

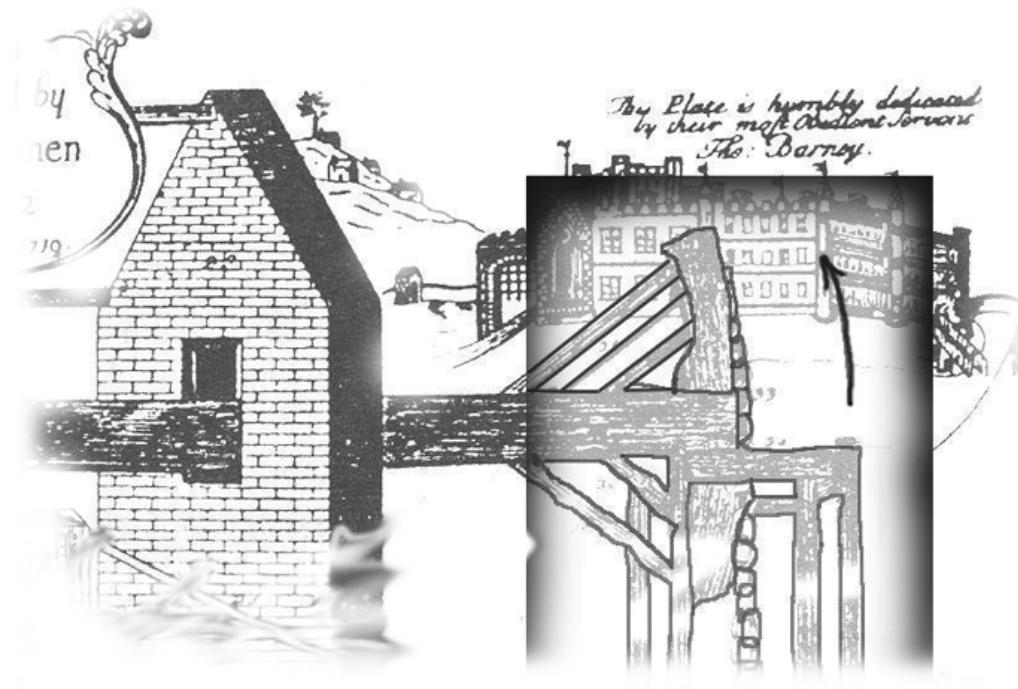
La filosofía encerrada en esta definición se traduce en la aparición en el sistema empresa de un subsistema que garantiza que los flujos de materia, energía e información circularán tanto en el interior de la empresa como, a través de su frontera, con el mundo exterior en la forma más adecuada para que la empresa alcance sus objetivos, que

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

no son otros, desde una perspectiva ética que siempre debería ser tenida en cuenta, que satisfacer las necesidades generadas en su entorno y que la empresa debería estar en condiciones de identificar (marketing, planificación,etc), logrando, a partir de la consecución de ese fin, el justo beneficio y los medios necesarios para continuar cumpliendo su función. El **subsistema o departamento logístico** se convierte así en una especie de sistema nervioso de la empresa, que se difunde por toda ella desde los procesadores operativos de más bajo nivel hasta el supremo, de manera que en alguna forma todos los departamentos y secciones participan en y de la logística.

19

Herramientas matemáticas para modelar sistemas



Como hemos podido ver a lo largo de las páginas anteriores la Teoría General de Sistemas es una ciencia, teórica y experimental, de la totalidad. Desde su inicio, cualquiera que sea la fecha que se le quiera poner aunque su bautizo con este nombre sea reciente, los intentos para formalizarla como una disciplina lógico-matemática aplicable a diferentes ciencias, tanto empíricas como especulativas, han sido constantes.

Esta herramienta se concretó inicialmente en el uso de las ecuaciones y sistemas de ecuaciones diferenciales lineales o, en el peor de los casos, reducibles a ecuaciones lineales, el álgebra vectorial (cálculo matricial, teoría de autovalores,etc) y, de forma más general, el análisis funcional y la teoría general de operadores. Estas herramientas, bajo ciertas condiciones simplificadoras, se han mostrado eficaces no solo para encontrar soluciones a los problemas de tipo cerrado y “sencillo” de la física, sino también para el estudio de otras ciencias que como la economía, la biología, la sociología y las ciencias del comportamiento se han formalizado más recientemente.

Pero ya en el siglo XIX este impresionante arsenal matemático, base de toda la ciencia clásica, empezó a mostrar su insuficiencia ante dos circunstancias que afectan al estudio de los sistemas: **la incertidumbre y la imprecisión.**

Para la primera el Cálculo de Probabilidades y la Estadística con sus diversas ramas (Teorías de la Estimación y de los Procesos

Aleatorios, los modelos de Previsión, el Análisis Multivariante, etc) han dado solución a muchos problemas, pero su correcta aplicación está sujeta a fuertes restricciones teóricas y prácticas.

Pero la cada vez mayor complejidad de los problemas organizacionales ha generado la necesidad de herramientas que proporcionen una base rigurosa a la adopción de decisiones. Por otro lado las líneas de la investigación científica se orientan cada vez más hacia el estudio de sistemas abiertos donde la formalización matemática clásica es insuficiente. Así, y a lo largo de este siglo han ido surgiendo otros útiles y artificios, algunos, como el ya visto de la caja negra, procedentes de otras disciplinas afines como la cibernetica (teoría de la regulación automática) y la robótica, y otros de muy reciente aparición como son las teorías de la información y de la codificación (tan importantes para dos ciencias aparentemente tan dispares como la teoría de la comunicación y la genética), la topología de redes (aplicable a una increíble variedad de problemas y situaciones aparentemente sin puntos en común), la algorítmica y las técnicas de la matemática discreta, la programación matemática (lineal, cuadrática, dinámica) y todas aquellas técnicas, que conforman la Investigación Operativa o Investigación de Operaciones (problemas de transporte, asignación y flujos óptimos, modelos de inventarios, fenómenos de espera o colas, secuenciación óptima de actividades y tareas, la teoría de la decisión y de los juegos, o algo tan importante para la ingeniería logística como es el análisis de la fiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y renovación de equipos). Es obvio señalar que el uso de estas herramientas se ha visto potenciado por el empleo del ordenador.

El ordenador ha permitido también el tratamiento de problemas para los que la formalización matemática del sistema concebido del objeto analizado, tanto en sus elementos deterministas como en los aleatorios, es muy difícil o imposible. Esta dificultad se ha reducido en gran medida gracias al uso cada vez más general de las llamadas técnicas de simulación, las cuales, y con el imprescindible soporte del ordenador, permiten el modelado y estudio de muchos sistemas de

estructura compleja. Los modelos de simulación, una vez validados, son susceptibles de ser estructurados, con ayuda de útiles muy específicos, llamados lenguajes de simulación, como programas de ordenador que, ejecutados, proporcionan un remedio o simulación del comportamiento que el objeto analizado tiene en la realidad, si el objeto ya existe y se quiere mejorar el conocimiento que se tiene de él, o que podría tener, caso de que el objeto estuviera en una fase de diseño o planificación (diseño óptimo de una central telefónica, de un aeropuerto, de una planta de producción, ubicación óptima de una red de almacenes de distribución o de puntos de venta, etc). Lógicamente, cuanto mayor sea la validez, ésto es, la adecuación entre el modelo y el objeto tanto más correctas serán las conclusiones que acerca del comportamiento y evolución del objeto hayamos extraído. La validez de los resultados de un modelo de simulación pasa por la ejecución de un elevado número de ejecuciones del modelo y de un muy fino análisis estadístico del conjunto de resultados obtenidos.

Una nueva situación está empezando a ser estudiada con el fin de formalizarla en lo posible: es la imprecisión, un hecho que se nos presenta cuando el dato proporcionado o el concepto considerado no están definidos con la exactitud de la lógica formal. Esto es debido a nuestras dificultades de percepción comunicación, pero con ella convivimos diariamente y, bajo ella, adoptamos decisiones trascendentales.

Hasta ahora este tipo de situaciones eran tratadas con métodos a los que podemos dar el nombre de intuitivos, ya que el responsable de adoptar las decisiones lo hacía basándose en su experiencia o, en el mejor de los casos, como ocurre en los métodos Delphi y del panel de expertos o con la técnica de los escenarios, un grupo de expertos evaluaban conjuntamente una situación adoptando una decisión una vez más basada en la experiencia común compartida.

Para no ponernos demasiado serios vamos a considerar la situación muy frecuente en la que, refiriéndonos a una persona, deci-

mos “José es joven”. ¿Qué significa ésto? No creo que nadie se atreva a afirmar que una persona es joven hasta el momento de cumplir cuarenta años para inmediatamente dejar de serlo. Posiblemente, y si José no ha superado todavía los treinta años, usted no dudaría en afirmar que, efectivamente, José es una persona joven, mientras que opinaría que “es bastante joven” si tiene entre treinta y cuarenta años, “cada vez menos joven” si no pasa de los cincuenta y “nada joven” si rebasa esta edad.

Esto significa que si designamos por **A** el conjunto de las personas jóvenes una persona, a diferencia de lo que ocurre con los conjuntos convencionales del álgebra convencional, no se encuentra en la situación de pertenecer o no pertenecer al conjunto **A**, sino que pertenece a dicho conjunto con un cierto grado de intensidad comprendido entre **0** y **1** y no pertenece en un grado complemento a **1** del anterior. El conjunto A es un ejemplo de lo que se conoce como un **conjunto borroso, vago o difuso** (fuzzy set, en inglés) y su caracterización se hace en términos de lo que se conoce como **función de pertenencia $m(A,x)$** del conjunto A, una función que a toda edad **x** le asocia un número del intervalo **[0,1]**, su grado de pertenencia. En el ejemplo utilizado, una posible función de pertenencia sería la de la Figura 26.

Ejemplos de situaciones de este tipo se dan constantemente en el mundo de técnica y de la economía. Ciertos espíritus malévolos definen a los economistas como profesionales que dedican un mes al año a elaborar un presupuesto y once meses a explicar porqué no se cumple. Bromas aparte, la cosa no es para menos, ya que a la hora de elaborar el presupuesto de una empresa entran en juego multitud de factores y entre ellos juegan un papel importante las tasas de inflación y de interés del dinero. De acuerdo a lo que sugiere el Profesor J. Gil Aluja, en un mundo tan cambiante como el actual a lo más que podemos aspirar para tener datos de alguna fiabilidad es que un **experto** nos diga que, por ejemplo, la tasa de inflación estará entre un 4% y un 7% y que entre estos extremos los posibles valores pueden darse con

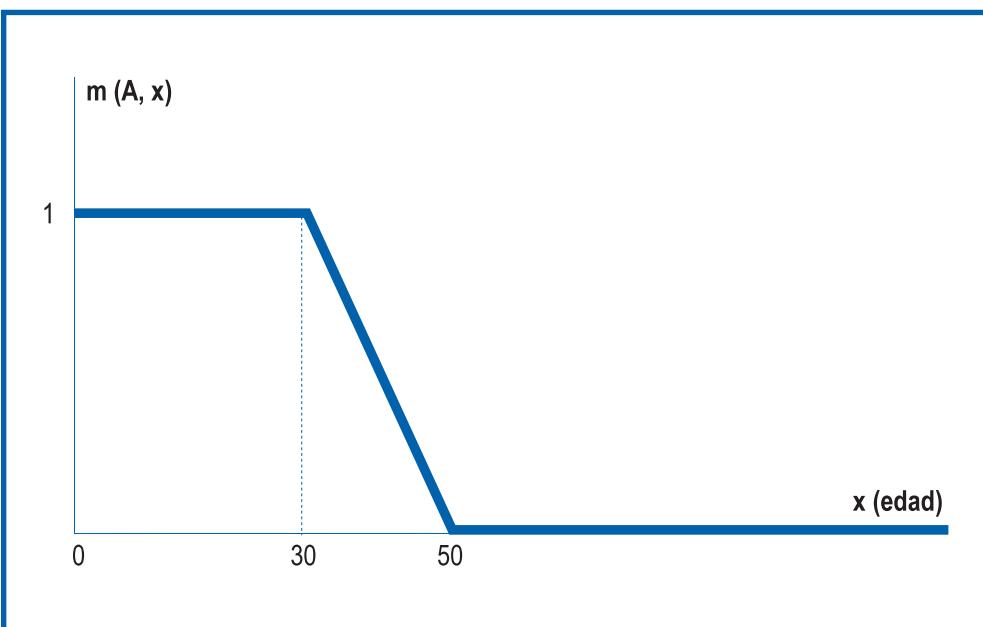


Figura 26. - FUNCIÓN DE PERTENENCIA DEL CONJUNTO A DE LAS PERSONAS JÓVENES -

una determinada **posibilidad** (¡cuidado!, digo **posibilidad**, grado de creencia, pero no probabilidad, ya que no hay suficiente repetitividad de sucesos y circunstancias que permitan utilizar la herramienta probabilística) que, siempre en su opinión, podría, por ejemplo venir reflejada en la Figura 27, de acuerdo con la cual a una tasa de inflación del 6% el experto le asigna una **posibilidad** 0.5. El experto nos proporciona así un número borroso. Los que estén acostumbrados a trabajar con redes PERT para la planificación de actividades y gestión de proyectos reconocerán esta situación como familiar a la hora de establecer la duración de algunas actividades sobre las que hay poca o ninguna información: en este caso se pregunta a un experto cual es en su opinión los duraciones más corta, más largo y más “possible” en que la actividad en cuestión puede ser ejecutada; las respuestas del experto constituyen el soporte para un número triangular borroso.

En el campo de la tecnología y de la investigación se dan estas situaciones con mucha frecuencia: ¿cómo analizar la fiabilidad de un

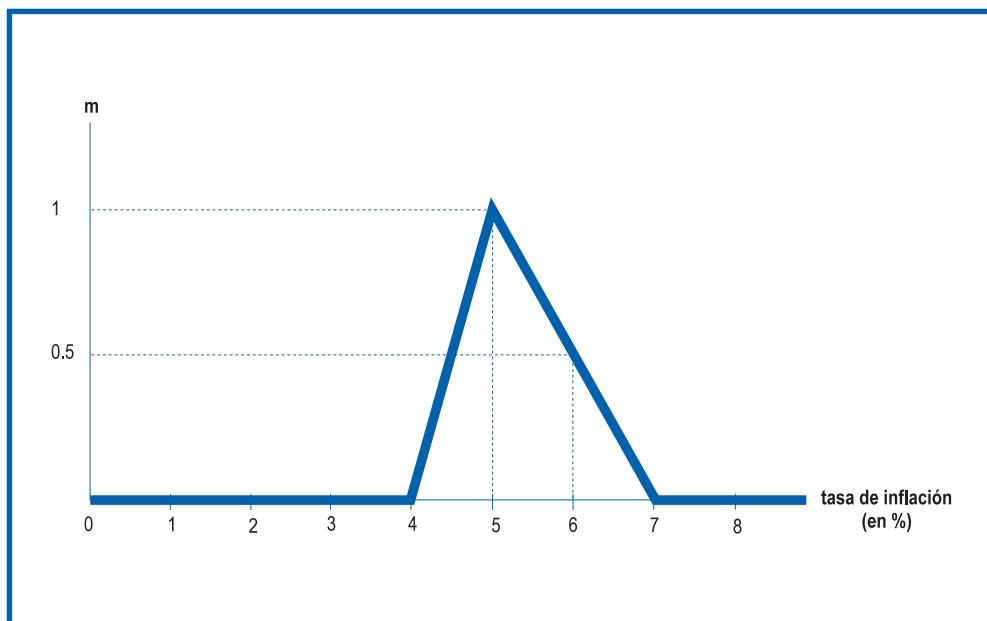


Figura 27. - ÍNDICE DE INFLACIÓN BORROSO -

nuevo sistema de cuyas componentes, aún conocida su fiabilidad individual, no se sabe con precisión como van a interaccionar? El análisis de fiabilidad basado en probabilidad es, por ahora, insuficiente mientras que este tipo de técnicas parece mostrar ciertas perspectivas de éxito. Por otro lado en el campo de la prospectiva de sistemas y en la adecuación de ciertas técnicas de previsión, como el método Delphi, la lógica borrosa se muestra como un instrumento muy adecuado. Incluso situaciones bien precisas en sus términos, pero con interrelaciones muy complejas, son susceptibles de una solución “borrosificada” (¡perdón!, no encuentro una palabra mejor).

Lofty Zadeh es el padre de esta herramienta a la que denominó **lógica borrosa** (fuzzy logic), cuyo objetivo es el manejo de la incertidumbre. Desde el inicial escepticismo que supuso su propuesta hace treinta años hasta hoy, un enorme y creciente esfuerzo de investigación teórica y aplicada está siendo desarrollado con resultados espectaculares en muchos, como, por ejemplo, en el diseño de dispositivos

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

tivos de control para grandes sistemas (sistemas de frenado) y también para pequeños (enfoque automático de máquinas de fotos), superando en muchas ocasiones a los sistemas de control convencionales. Por otro lado es evidente la conexión entre la lógica borrosa, la inteligencia artificial, en especial con los sistemas expertos, las redes neuronales y la simulación cualitativa, todos ellos ramas de lo que se conoce como razonamiento aproximado.

20

Reflexiones finales



Como todas las cosas de este mundo también esto ha llegado a su final. A lo largo de estas páginas he pretendido presentar la filosofía de la Teoría General de Sistemas y el fruto de la misma, **la sistémica o ciencia de los sistemas**. He intentado, ojalá que con éxito, mostrar a la Teoría General de Sistemas como una ciencia de la globalidad, en la que las ciencias rigurosas y exactas nacidas del paradigma cartesiano no sólo pueden convivir sino que se potencian mutuamente por su relación con las conocidas como ciencias humanas, y en la que la lógica disyuntiva formal, que desde Aristóteles hasta nuestros días ha realizado enormes progresos y conducido a resultados espectaculares, se da la mano con las lógicas recursivas y las borrosas.

Es a través de esta posibilidad de integración como la sistémica, el paradigma de la complejidad, mezcla de arte, ciencia, intuición y heurística, que permite modelar sistemas complejos (**ingeniería de los sistemas complejos**, la llama Le Moigne), es hoy un sistema y una filosofía de pensamiento en plena expansión en cuanto a las ciencias que confluyen en él: desde los campos del conocimiento tradicionalmente asociados a ella, como son las ciencias de la ingeniería y de la organización, a las que, aunque no tan jóvenes, se van incorporando, como las ciencias políticas y morales, la sociología, la biología, la psicología y la psiquiatría, la lingüística y la semiótica (¿ha leído la apasionante novela de Umberto Eco “El nombre de la rosa”?), o las que por su juventud han sido integradas casi desde su nacimiento, cual ocurre con la informática, la inteligencia artificial o la ecología.

Pero hay algo más que interdisciplinaridad en la Teoría General de Sistemas. Yo soy el autor de estas líneas que, en consecuencia, constituyen mi modelo de la Teoría General de Sistemas, pero al tiempo que las escribía y reflexionaba sobre lo que se iba volcando sobre el papel, algo ha cambiado en mí, lo escrito actuaba sobre mí a la vez que era mi obra, de forma que, si tuviera que volver a escribir el libro posiblemente diferiría algo del que está terminando de leer. Esta es una característica del pensamiento sistémico: es una ciencia del conocimiento, una epistemología, experimental y recursiva, que rompe de esta forma con el positivismo científico que ha caracterizado a la ciencia occidental, no así a las orientales, durante muchos años, y que las ha conducido a una cierta esterilidad y a la incapacidad para abordar muchos de los problemas de nuestro tiempo. Al reflexionar continuamente sobre las raíces de su funcionamiento y concebida a su vez como un sistema, tal como lo hemos entendido aquí, la sistémica evita caer en el peligro del positivismo, en el cual [7] *cada disciplina, aislada del conjunto social y de la tradición histórica de la que nació y en la que vive, se dogmatiza, ignora sus presupuestos y su funcionalidad: se convierte en un fin en sí misma, y se hace ciega acerca del contexto social que la hace posible.* Devuelve así la sistémica a las ciencias experimentales y a las ciencias básicas de la ingeniería la vieja tradición de universalidad que la epistemología cartesiana y el positivismo científico, tan fértiles por otros conceptos, les había arrebatado, y entra de lleno en la visión de K. Popper, por la que toda ciencia o sistema filosófica que se considere a sí mismo como cierto es falso.

Sugiere Le Moigne [3] que así como los años ochenta vieron un desarrollo de las ciencias de la autonomía y de la complejidad dentro de la sistémica, los noventa conocerán un desarrollo profundo de las nuevas ciencias del conocimiento, ya que toda reflexión sobre el estudio y modelización de los sistemas complejos, naturales o artificiales, conduce a una reflexión sobre el propio proceso de conocimiento y modelización y, a la vez, sobre la forma de transmitir-

lo. Es éste un proceso que cada vez es percibido con más fuerza por muchos especialistas, que han llegado incluso a definir nuestra sociedad como la **sociedad del conocimiento** [8].

Personalmente debo a mi interés por estos temas no sólo el que mi mente haya ampliado sus horizontes, reforzando así la visión que tengo del mundo desde mi perspectiva de creyente, sino que además he adquirido plena conciencia de la necesidad del trabajo en equipo a la hora de estudiar un fenómeno. Un equipo en el que no bastan ni el generalista ni el especialista, sin que todos los miembros, dentro de su especialidad concreta, estén obligados a un mínimo de generalidad en su formación de base.

Por ello, desde la vocación y perspectiva de un universitario, quiero compartir una reflexión que me preocupa profundamente. Ya he escuchado a algunos colegas utilizar el término **Multiversidad**, por contraposición al de **Universidad**, para designar a nuestros centros superiores de enseñanza. No es para menos. Resulta preocupante que tanto los programas de nuestra enseñanza secundaria como universitaria rompan el carácter unitario de la ciencia y la formulen con una visión cada vez mas reduccionista, dando más importancia a los conocimientos que al conocimiento, a las ciencias particulares de cada área que a la ciencia, a las tecnologías concretas que a la técnica, a los plurales que al singular. No se crea que voy a reivindicar ahora los “Trivium” y “Cuatrivium” medievales, pero resulta penoso comprobar el escaso nivel medio de cultura de nuestros universitarios, cada uno encerrado en su propia parcela de limitados conocimientos e ignorando, cuando no despreciando, otras parcelas, en ocasiones muy próximas a la suya “específica”. Ojalá que sepamos aprovechar las oportunidades que ofrecen las directrices de los nuevos planes de estudios de las carreras universitarias.

Después de hacer énfasis en la filosofía globalista que soporta la Teoría General de Sistemas, quiero insistir también en su forma de estudiar los fenómenos, en su particular vía de realizar el clásico pro-

ceso análisis-síntesis. Un analista sistémico jamás puede perder de vista, al diseccionar los diferentes componentes de un sistema, al propio sistema globalmente considerado, de forma que cuando se plante una determinada actuación sobre una componente tiene que considerar al mismo tiempo qué interacciones van a generarse con las otras componentes y cómo va influir todo ello en el sistema global, teniendo siempre presente el principio de que la suma de óptimos individuales pueden no ser óptima para el sistema. El olvido de este principio no sólo llevó a la cárcel a los ladrones de nuestro primer ejemplo, sino que cuando dicho pecado es cometido por administradores políticos, empresarios, responsables familiares, etc,... pueden sobrevenir resultados catastróficos para la sociedad, la empresa, la naturaleza o la familia. Una mirada a la historia de nuestro mundo nos puede dar pruebas de estas circunstancias.

Un tercer punto a recordar en este apartado de concusiones es el hecho de que todo sistema, para sobrevivir, necesita realimentación interna e intercambio de flujos de muy variada naturaleza con su entorno a fin de evitar el crecimiento constante de su entropía, que le llevaría a su muerte térmica. Este intercambio de flujos debería permitir la admisión de variedad para reducir la entropía. La negativa a asumir esta incorporación de variedad en sistemas sociales y organizaciones suele conducir también a graves problemas políticos y económicos; los fundamentalismos de todo tipo que están surgiendo en tantas partes del mundo son ejemplos paradigmáticos de esta negación de la variedad al pretender desarrollar al precio que sea, un modelo demasiado uniforme de sociedad, sea en lo cultural, lo lingüístico, lo religioso, o en lo económico, cuando no en todos ellos.

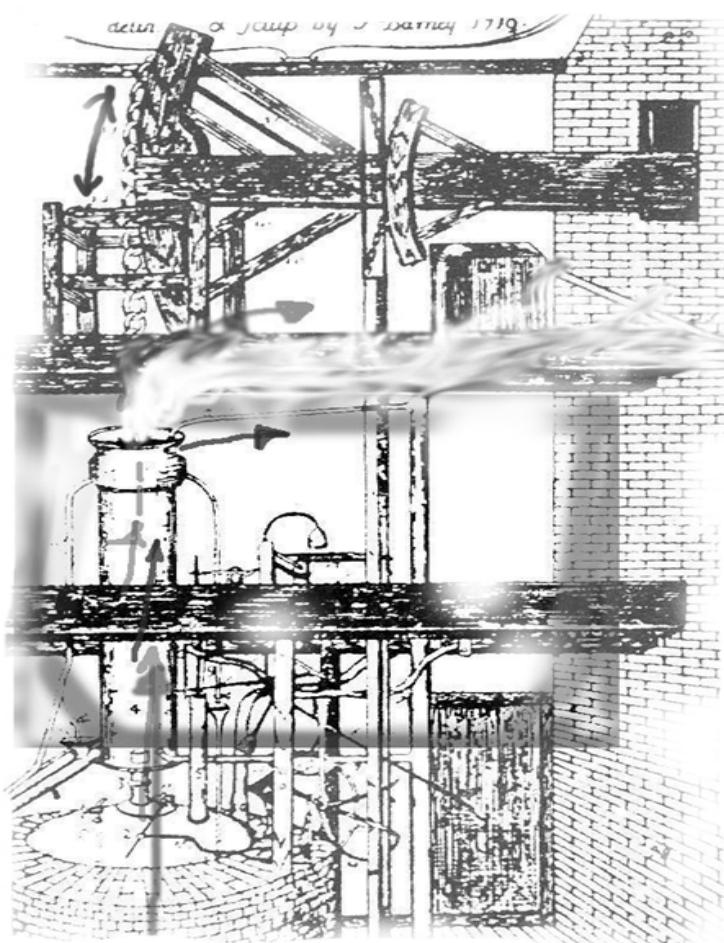
En fin, como tampoco creo haber sido respetuoso con los principios de la Teoría General de Sistemas, el que esté libre de pecado tire la primera piedra, pero entre tanto que el buen Dios nos perdone a todos por tratar de ocultar a nuestros semejantes SU UNIVERSO. Amén.

Recordatorio final



Un último y cariñoso recuerdo al equipo editor de esta serie de monografías, sin cuyas amables y pacientes objeciones las anteriores páginas hubieran sido un pequeño desmadre. Muy en particular a Alberto Sols, cuya paciencia y capacidad de diálogo fueron sometidos a dura prueba que, superada con éxito, le permiten ostentar orgullosamente el título de **Sistémico de Honor**.

Referencias



LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

- [1] Goldratt, E.M. & Cox, J.:La Meta. Un proceso de mejora continua, Madrid, Edit. Taular, 1987.
- [2] Bertalanffy, L. von., General System Theory: A new approach to Unity of Science, Human Biology, Diciembre 1951.
- [3] Le Moigne, J.L., La théorie du système général, (3^a edición). París, PUF, 1990.
- [4] Forrester, J.W., Industrial Dynamics, Cambridge, Mass, The MIT Press, 1961.
- [5] Jiménez, P., Ingeniería de Sistemas, Apuntes Máster de Logística Integral, E.T.S. de Ingenieros Industriales de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid (ICAI), 1992.
- [6] Arbones, E.A., Logística empresarial, Barcelona, Marcombo, 1990.
- [7] Hortal, A., La ética profesional en el contexto universitario, Conferencia inaugural curso 1994-95 en la U. P. Comillas.
- [8] Morillas, L.M., La sociedad del conocimiento. San Cugat del Vallés, Cuadernos del Institut de Teología Fonamental, Ed. Cristianismo y Justicia, 1994.

Bibliografía

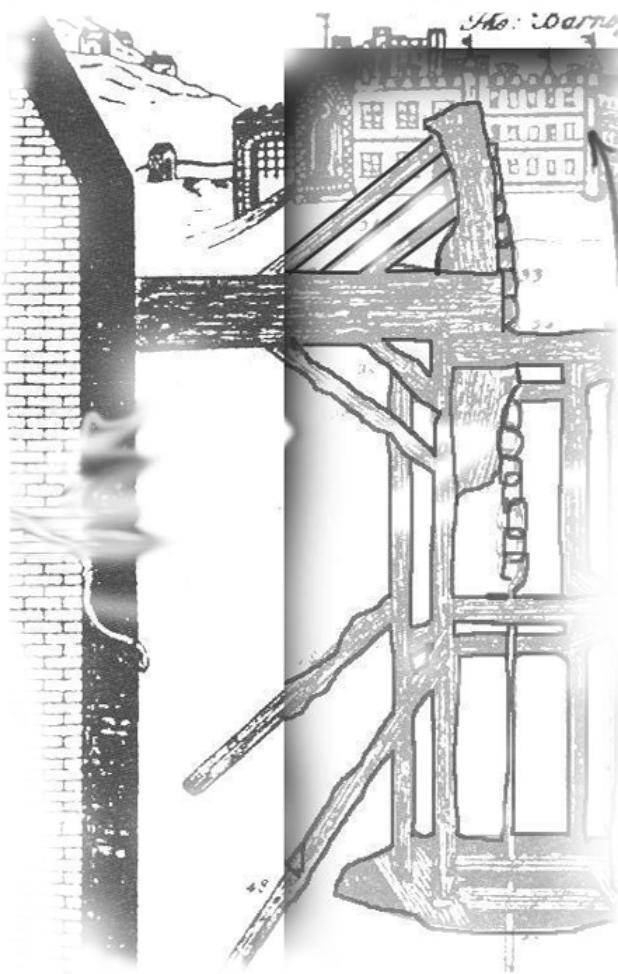


LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

- Aracil, J.:** *Introducción a la Dinámica de Sistemas.*
Madrid, Alianza Editorial, 1978.
- Arbib, M.A.:** *Computers and Cybernetic Society.*
New York, Academic Press, 1977.
- Ashby, W.R.:** *An introduction to cybernetics.*
Londres, Chapman & Hall, 1956.
- Von Bertalanffy, L.:** *General Systems Theory.*
New York, George Braziller, 1968.
- Blanchard, B. S.:** *Logistics Engineering and Management.*
Englewood, Prentice Hall, 1990.
- Buffa, E. & R. Sarin:** *Modern Production and Operation Management.*
New York, John Wiley, 1987.
- Cañón, C.:** *La matemática: creación y descubrimiento.*
Madrid, Dpto. de Publicaciones de la U.P. Comillas, 1993.
- Clymer, J.R.:** *Systems Analysis using Simulation and Markov Models.*
Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1990.
- Drucker, P.:** *The New Society of Organizations.*
Harvard Business Review, 1992.
- Durand, D.:** *La systémique.*
Paris, Presses Universitaires Francaises (PUF), 1979.
- Engen:** *Stochastic Abundance Models.*
New York, Chapman & Hall, 1978.
- Fishwick, P. & P. Lukas:** *Qualitative Simulation: Modeling and Analysis.*
New York, Springer Verlag, 1991.
- García Doncel, M. & otros:** *Filosofía de la Ciencia hoy.*
San Cugat del Vallés, Cuadernos del Institut de Teología Fonamental, Ed. Cristianismo y Justicia, 1994.
- Gómez-Pallete, F.:** *Estrategia empresarial ante el caos.*
Madrid, Ediciones Rialp, 1993.
- Green, L.:** *Logistics Engineering.*
New York, John Wiley, 1991.
- Hillion, A.:** *Les théories mathématiques des populations.*
París, PUF, 1986.
- Juárez, M.:** *Informe FOESSA 1994.*
Madrid, Fundación FOESSA, 1994.
- Klir, G.J.:** *An Approach to General Systems Theory.*
New York, Van Nostrand-Reinhold, 1969.
- Lancry, J.P.:** *Théorie de l'information et economía.*
París, Economica, 1982.
- Lilienfeld, R.:** *Teoría de sistemas.*
Méjico, Trillas, 1984.

- Martínez & Requena:** - *Dinámica de Sistemas.*
Madrid, Alianza Editorial, 1986.
- *Simulación Dinámica por Ordenador.*
Madrid, Alianza Editorial, 1986.
- Mesarovic, M.D.& Y. Takahara:** *General System Theory.*
New York, Academic Press, 1975.
- Morin, E.:** *La méthode (2 tomos).*
París, Ed. du Seuil, 1980.
- Pardo, L. & Valdés.:** *Simulación: Aplicaciones prácticas en la Empresa.*
Madrid, Díaz de Santos, 1987.
- Peter, L.J. & R. Hull:** *El Principio de Peter.*
Barcelona, Ed. Plaza y Janés, 1972.
- Pidd, M.:** - *Computer Simulation in Management Science.*
Chichester, John Wiley, 1986.
- *Computer Modelling for Discrete Simulation.*
Chichester, John Wiley, 1989.
- Popper, K.R.:** *La société ouverte et ses ennemis (2 tomos).*
París, Ed. du Seuil, 1979.
- Prigogine, I. & I. Stengers:** *La nueva alianza: metamorfosis de la ciencia.*
Madrid, Alianza Editorial, 1990.
- Thom, R.:** *Modèles mathématiques de la morphogenèse.*
Paris, UGE, 1974.
- Shannon, C.E. & W. Weaver:** *A mathematical theory of communication.*
Urbana, University Illinois Press, 1967.
- Weinberg, G.M.:** *An Introduction to General Systems Thinking.*
New York, Wiley Interscience, 1975.
- Weisbuch, G.:** *Dynamique des systèmes complexes.*
París, InterEditions et Editions CNRS, 1989.
- Wiener, N.:** - *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and in the Machine.*
Cambridge, Mass., The MIT Press, 1947.
- *Cybernétique et société.*
París, Ed. des Deux-Rives, 1952.
- Yoldi, J.A.:** *El caso Galileo.*
San Cugat del Vallés, Cuadernos del Institut de Teología Fonamental, Ed. Cristianismo y Justicia, 1994.
- Zadeh, L. & E. Polak:** *System Theory.*
New York, Mac Graw-Hill, 1969.

Glosario



1. Adaptación. Un tipo de evolución por la cual el sistema crea programas y pautas de comportamiento que le permiten asimilar relaciones con su entorno que no había programado inicialmente.

2. Caja negra. Dispositivo heredado por la Teoría General de los Sistemas de los ciberneticos, que permite modelar inicialmente un objeto del que sólo percibimos sus entradas, es decir la actuación sobre él del entorno, y sus salidas, o sea, la actuación de el objeto sobre su entorno.

3. Curva logística o curva en S. Curva que representa la evolución de una magnitud cuya tasa de crecimiento es proporcional al producto del valor actual de dicha magnitud y de su diferencia con una cota superior de la misma. Suele servir de modelo matemático para representar la penetración de un producto en el mercado.

4. Dinámica de Sistemas. La más popular de las técnicas de modelización sistémica, desarrollada por J. Forrester en los años 50. Sus esquemas son fácilmente comprensibles por los profanos y constituye la base de otras herramientas de modelización.

5. Entropía. Es una función del estado de un sistema, cuyo crecimiento es inverso a la variedad de formas y estructuras que el sistema presenta.

6. Equilibración. Fase de la evolución de los sistemas por la que estos cambian su estructura para conservar su identidad.

7. Logística. El arte y la ciencia de las actividades técnicas, de gestión e ingeniería relacionadas con las necesidades y recursos de diseño, aprovisionamiento y mantenimiento necesarios para alcanzar objetivos, desarrollar planes y servir de soporte a operaciones.

8. Operador. Un subsistema de un sistema de orden superior que recibe una entrada de materia, energía o información y genera una salida del mismo o diferente tipo e incluso una salida de tipo decisión.

9. Operador supremo. Dícese de aquel operador situado en la cúspide de la jerarquía de los sistemas de mayor nivel y que establece los fines del objeto y puede señalar su evolución.

10. Organización. la suma de una estructura más un programa conectados a través de una memoria.

11. Paradigma. Concreción práctica, que sirve como norma o modelo de referencia en un campo concreto de la actividad humana (ciencia, arte, política, etc,...) de una concepción filosófica, sistema de valores o línea de pensamiento.

12. Realimentación. Característica de algunos sistemas que convierten toda o parte de su salida en toda o en parte de su entrada, en orden a facilitar su regulación.

13. Redundancia. Propiedad de los sistemas complejos por la que diferentes operadores pueden realizar una misma función aunque de forma diferente.

14. Regulación. Primera fase de la evolución de un sistema por la cual el sistema parece eliminar los comportamientos que parecen contrarios a sus fines.

15. Sinergia (Principio de). Es una propiedad de los sistemas por la cual un sistema tiene propiedades que no poseen sus

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

subsistemas. Se expresa frecuentemente con la frase "el todo no es la suma de las partes".

16. Sistema. Modelo de un objeto percibido. No existe en la realidad, sólo en la mente del que lo crea.

17. Sistema abierto. Un sistema que intercambia flujos de energía, materia o información con su entorno. Su evolución no está pues predeterminada y el crecimiento de su entropía puede ser interrumpido, de forma que su variedad no sólo puede no decrecer sino que incluso puede aumentar

18. Sistema cerrado. Un sistema aislado de su entorno con el que no intercambia nada. Desde el punto de vista sistémico no hace nada en nada y su evolución le lleva hacia un estado de máxima entropía, es decir, de máxima uniformidad y mínima variedad.

19. Sistema complejo o caliente. Sistemas con una jerarquía de criterios y fines compartidos y redes de comunicación sencillas y accesibles al nivel de cada procesador.

20. Sistema complicado o frío. Sistemas con almacenamientos de memoria no compartidos, funciones de un cierto procesador desconocidas o conocidas parcialmente por otros procesadores, criterios y objetivos parciales no coordinados, redes de comunicación arborescentes, etc,...

21. Sistema general o generalizado. Un modelo sistémico de un objeto percibido y diferenciado mediante una frontera de su entorno, estructurado y activo, y que, de acuerdo con una dinámica, evoluciona hacia un fin, impuesto o asumido según el nivel de jerarquía del objeto.

22. Sistema de representación. Es método concreto que elige el modelizador para, de acuerdo con la Teoría General de Sistemas, generar su modelo.

23. Sistémica. Es la ciencia de la modelización que se apoya en la Teoría General de Sistemas.

24. Teoría General de Sistemas. Una filosofía y un método científico para estudiar y analizar objetos y elaborar modelos de los mismos concibiéndolos no como aislados de los demás objetos sino en interacción con ellos.

*Esta primera edición de
LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS
de la serie de
Monografías de Ingeniería de Sistemas
se terminó de imprimir el día
10 de febrero de 1995.*