

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

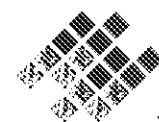
Sr. D. Carlos Casajús Díaz
Vicealmirante Ingeniero de la Armada

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

Sr. D. Ricardo Torrón 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 Azoárate 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.*
2. La Teoría General de Sistemas. *Ángel A. Sarabia.*

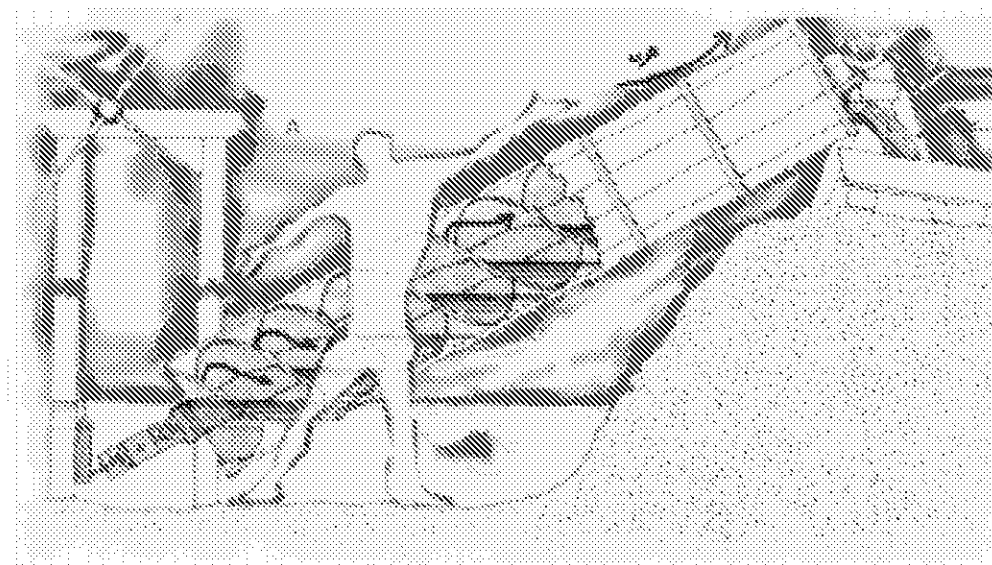
Publicaciones de Ingeniería de Sistemas

3

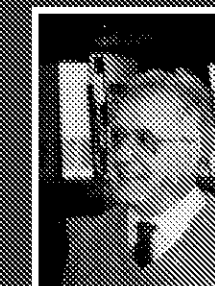
DINÁMICA DE SISTEMAS

por

Javier Aracil



3



Javier Aracil

En la actualidad es Catedrático de Ingeniería de Sistemas y Automática, en la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla.

Ha investigado sobre las aplicaciones de la teoría de sistemas dinámicos al modelado y control de sistemas tecnológicos y socioeconómicos, prestando especial atención a la teoría cualitativa (bifurcaciones, estudio global de los modos de comportamiento, cambio cualitativo, caos,...) de la dinámica de sistemas. En este contexto ha desarrollado una línea original de investigación, que ha alcanzado reconocimiento internacional al ser galardonado con el *Premio Forrester 1986*. Es autor de gran número de publicaciones en revistas de su especialidad y de varios libros, entre ellos *Introducción a la Dinámica de Sistemas*, Alianza Editorial y *Máquinas, sistemas y modelos*, Tecnos.

Es miembro numerario de la Academia de Ingeniería de España, de la Real Academia de Medicina de Sevilla y de la Academia Sevillana de Ciencias.

ILUSTRACIÓN DE PORTADA
Tornillo de Arquímedes.

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: Marzo - 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.

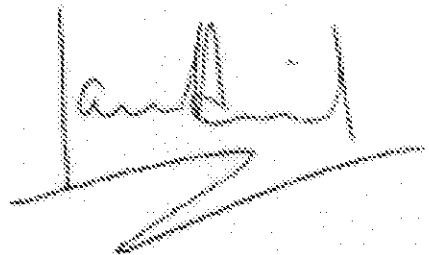
Impresión:
Gráficas Marte, S.A. (Madrid)

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

Nota previa

El autor desea agradecer a los miembros del Comité de Redacción de esta serie, en especial al Teniente General Martín Aleñar Ginard y a Alberto Sols, los interesantes comentarios que hicieron al primer borrador de esta monografía.

Asimismo aportaron valiosas sugerencias Teodoro Álamo y Francisco Gordillo, del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla.



.....

.....

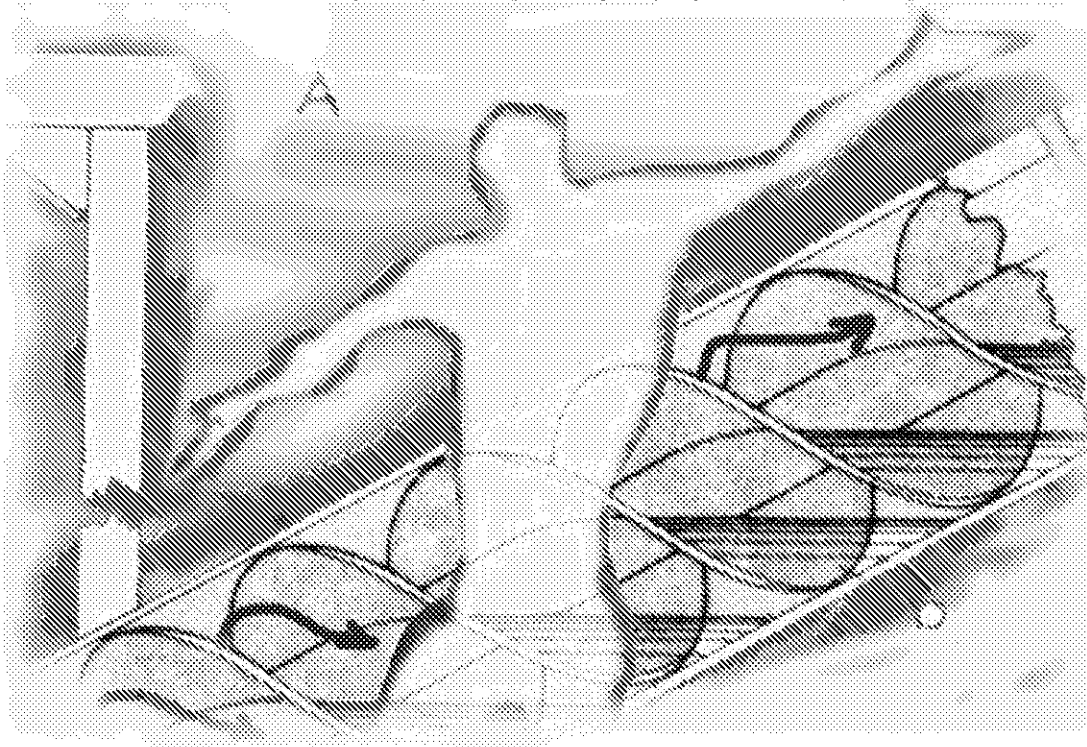
.....

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN A LA DINÁMICA DE SISTEMAS	7
	1.1. Generalidades	8
	1.2. Metodología sistémica	10
	1.3. Aplicaciones de la dinámica de sistemas	17
2.	ESTRUCTURA ELEMENTAL DE SISTEMAS	18
	2.1. Un lenguaje elemental para la descripción de sistemas	21
	2.1.1. <i>Bucle de realimentación negativa</i>	24
	2.1.2. <i>Bucle de realimentación positiva</i>	26
	2.1.3. <i>Retrasos</i>	28
	2.1.4. <i>Sistemas complejos y estructuras genéricas</i>	33
3.	DE LA ESTRUCTURA AL COMPORTAMIENTO	34
	3.1. Introducción	34
	3.2. Génesis del comportamiento en un diagrama de influencias	35
	3.3. Dinámica de sistemas	49
4.	CONSTRUCCIÓN, ANÁLISIS Y EXPLOTACIÓN DE MODELOS	55
	4.1. Modelos de sistemas	56
	4.2. Proceso de modelado	57
	4.3. Simulación de un modelo	62
	4.4. Análisis de sensibilidad de un modelo	64
	4.5. Explotación de un modelo	67
	REFERENCIAS	71
	BIBLIOGRAFÍA	75
	GLOSARIO	79

1

Introducción a la dinámica de sistemas



1.1. Generalidades

En esta monografía vamos a tratar de *dinámica de sistemas*. Conviene empezar aclarando los sentidos en que emplearemos los dos términos que aparecen en esa locución. En primer lugar, empezemos por sistema. Este término se emplea con frecuencia, aunque con distintas acepciones. De modo coloquial hablamos de un sistema, como de un modo o manera de hacer algo; así, decimos que tenemos un sistema para resolver un problema o para alcanzar un objetivo. No es ese el sentido que nos interesa aquí. Más formalmente hablamos de un sistema como de un objeto dotado de alguna complejidad, formado por partes coordinadas, de modo que el conjunto posea una cierta unidad, que es precisamente el sistema. Así, hablamos del sistema planetario, formado por los planetas unidos mediante las fuerzas gravitatorias; de un sistema económico, formado por agentes económicos, relacionados entre sí por el intercambio de bienes y servicios; de un sistema ecológico, formado por distintas poblaciones, relacionadas mediante cadenas alimentarias o vínculos de cooperación; de una empresa, como sistema, en la que los distintos departamentos se coordinan en la organización empresarial; de una máquina, cuyas diferentes partes interactúan para lograr el fin para el que ha sido concebida. Este es el uso del término sistema que vamos a adoptar.

Un sistema, en este sentido, lo entendemos como una unidad cuyos elementos interaccionan juntos, ya que continuamente se afectan unos a otros, de modo que operan hacia una meta común. Es algo

que se percibe como una identidad que lo distingue de lo que la rodea, y que es capaz de mantener esa identidad a lo largo del tiempo y bajo entornos cambiantes.

De casi todo lo que nos rodea se puede decir que es un sistema. El hecho de que incluso en física no hayamos encontrado una partícula fundamental nos indica que todo está formado por partes ligadas por alguna forma de coordinación. Sin embargo, la consideración de que en la realidad todo está relacionado con todo puede pecar de excesivamente etérea, y resultar poco operativa. Nos interesará, como veremos, concentrarnos en ciertos aspectos de la realidad a los que quepa considerar como sistemas, aunque para ello tengamos que prescindir de alguna de sus conexiones.

Aquí nos ocuparemos de la clase de sistemas caracterizada por el hecho de que podemos especificar claramente las partes que los forman y las relaciones entre estas partes mediante las que se articulan en la correspondiente unidad. La descripción más elemental que podemos hacer de ellos es sencillamente enunciar ese conjunto de partes y establecer un esbozo de como se influyen esas partes entre sí. A esta descripción elemental asociaremos la imagen de un grafo (Figura 1a), cuyos nodos son esas partes, y cuyas aristas representan las influencias que se producen entre ellas. Este grafo aporta una descripción de naturaleza estructural del sistema, y diremos que representa su estructura. Veremos en el Capítulo 2 cómo podemos realizar esa descripción.

El otro término que aparece en la locución *dinámica* de sistemas es dinámica. El término dinámica lo empleamos por oposición a estática, y queremos con él expresar el carácter cambiante de aquello que adjetivamos con ese término. A algo que cambia asociamos una imagen como la de la Figura 1b, que muestra la trayectoria de una magnitud. Al hablar de la dinámica de un sistema nos referimos a que las distintas variables que podemos asociar a sus partes sufren cambios a lo largo del tiempo, como consecuencia de las interacciones

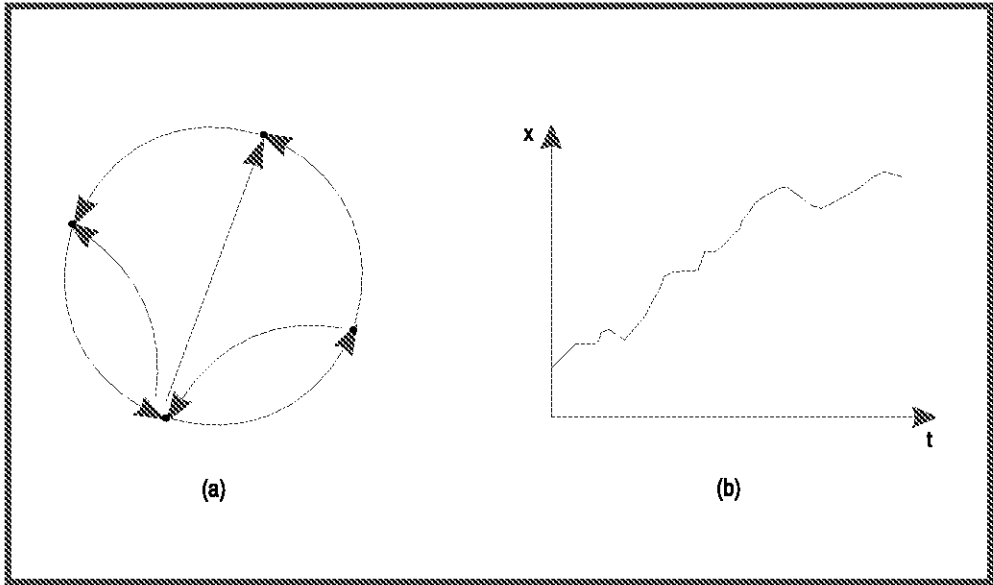


Figura 1. - IMÁGENES BÁSICAS DE LA ESTRUCTURA (a)
Y DEL COMPORTAMIENTO (b) DE UN SISTEMA -

que se producen entre ellas. Su comportamiento vendrá dado por el conjunto de las trayectorias de todas las variables, que suministra algo así como una narración de lo acaecido al sistema. Por otra parte, el término dinámico tiene una connotación no sólo de cambio, sino de la fuerza, de la determinación, que lo engendra. Veremos cómo estos significados se ajustan al uso que hacemos de ese término en dinámica de sistemas. En el Capítulo 3 presentaremos un lenguaje que nos permitirá describir cómo se genera el cambio en el seno de un sistema.

1.2. Metodología sistémica

Para el estudio de los sistemas en general se ha desarrollado lo que se conoce como metodología sistémica, o conjunto de métodos mediante los cuales abordar los problemas en los que la presencia de sistemas es dominante. En realidad, la metodología sistémica preten-

de aportar instrumentos con los que estudiar aquellos problemas que resultan de las interacciones que se producen en el seno de un sistema, y no de disfunciones de las partes consideradas aisladamente.

El análisis de un sistema consiste en su disección, al menos conceptual, para establecer las partes que lo forman. Sin embargo, el mero análisis de un sistema no es suficiente; no basta con saber cuáles son sus partes. Para comprender su comportamiento necesitamos saber cómo se integran; cuáles son los mecanismos mediante los que se produce su coordinación. Necesitamos saber cómo se produce la síntesis de las partes en el sistema.

Por ello, en el estudio de un sistema, tan importante es el análisis como la síntesis. El énfasis en la síntesis distingue la metodología sistémica de las metodologías científicas más clásicas de análisis de la realidad, en las que se tiende a sobrevalorar los aspectos analíticos por oposición a los sintéticos, mientras que en la metodología sistémica se adopta una posición más equilibrada. Tan importante es el análisis, que nos permite conocer las partes de un sistema, como la síntesis, mediante la cual estudiamos cómo se produce la integración de esas partes en el sistema.

El especialista en sistemas, al que se conoce también como sistemista, al estudiar un cierto aspecto de la realidad analiza cuáles son los distintos elementos que lo forman, al tiempo que trata de especificar cómo se produce la integración de esos elementos en la unidad del problema que está analizando. Por tanto, para él, tanta importancia tiene el todo —el propio sistema— como las partes, y al considerar al sistema como una unidad lo hará sin perder de vista las partes que lo forman, pero al considerar las partes, no perderá de vista que son eso, partes de un todo.

Lo que acabamos de decir puede pecar de abstracto. Vamos a ver, en esta monografía, cómo la dinámica de sistemas aporta un ejemplo concreto de una metodología en la que se articulan el análisis y la

síntesis, por lo que nos va a suministrar una muestra de una metodología sistémica.

En dinámica de sistemas vamos a ocuparnos de analizar cómo las relaciones en el seno de un sistema permiten explicar su comportamiento. Un sistema, ya lo hemos visto, es un conjunto de elementos en interacción. Esta interacción es el resultado de que unas partes influyen sobre otras. Estas influencias mutuas determinarán cambios en esas partes. Por tanto, los cambios que se producen en el sistema son reflejo, en alguna medida, de las interacciones que tienen en su seno. Los cambios en un sistema se manifiestan mediante su comportamiento (recuérdese la Figura 1b). Por otra parte, la trama de relaciones constituye lo que se denomina su estructura (Figura 1a). Lo que acabamos de decir se puede parafrasear diciendo que en dinámica de sistemas se trata de poner de manifiesto cómo están relacionados su estructura y su comportamiento. Su objetivo es el conciliar estas dos descripciones, de modo que aparezcan como las dos caras de una misma moneda.

La metodología sistémica suministra también un lenguaje que aporta nuevas formas de ver los problemas complejos. Las herramientas que aporta la dinámica de sistemas -desde los diagramas de influencias hasta los modelos informáticos- nos van a permitir ver los sistemas que pueblan nuestro entorno mediante una óptica diferente que nos descubrirá aspectos en los que posiblemente no hayamos reparado y que, de este modo, nos permite alcanzar una visión más rica de la realidad.

1.3. Aplicaciones de la dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas es una metodología ideada para resolver problemas concretos. Inicialmente se concibió para estudiar los problemas que se presentan en determinadas empresas en las que los retrasos en la transmisión de información, unido a la existen-

cia de estructuras de realimentación, da lugar a modos de comportamiento indeseables, normalmente de tipo oscilatorio. Originalmente se denominó dinámica industrial. Los trabajos pioneros se desarrollan a finales de los años 50, y durante los 60 tiene lugar su implantación en los medios profesionales [1] [2]. Esta implantación se produce tanto de una forma más o menos pura, siguiendo lo que podemos denominar la ortodoxia forresteriana, como, más habitualmente, de forma ecléctica, en simbiosis con otras metodologías de análisis sistémico. En particular, los diagramas de Forrester, o de flujos-niveles, que veremos luego, han alcanzado una amplia difusión y son empleados aun por aquellos que no mencionan explícitamente la dinámica de sistemas.

A mediados de los 60, Forrester propone la aplicación de la técnica que había desarrollado originalmente para los estudios industriales, a sistemas urbanos. Surge así lo que se denominó la dinámica urbana [3] [4] en la que las variables consideradas son los habitantes en un área urbana, las viviendas, las empresas, etc. Una aplicación análoga a la dinámica urbana la constituye la dinámica regional. Con estos modelos se pretende aportar un elemento auxiliar para la planificación urbana y regional, representando las interacciones que se producen entre las principales magnitudes socio-económicas del área correspondiente [5], y generando, a partir de ellas, las evoluciones de las magnitudes consideradas significativas: habitantes, indicadores económicos, etc. para, a partir de estas evoluciones, planificar las necesidades de infraestructura y otras.

A finales del decenio de los 60 se produce el estudio que posiblemente más haya contribuido a la difusión de la dinámica de sistemas. Se trata del primer informe al Club de Roma, sobre los límites al crecimiento, que se basó precisamente en un modelo de dinámica de sistemas, en el que se analizaba la previsible evolución de una serie de magnitudes agregadas a nivel mundial como son la población, los recursos y la contaminación [6] [7]. En este modelo se analizaba la interacción de estas magnitudes y se ponía de manifiesto cómo, en un

sistema, debido a las fuertes interacciones que se producen en su seno, la actuación sobre unos elementos, prescindiendo de los otros, no conduce a resultados satisfactorios. El informe correspondiente tuvo una gran incidencia en la opinión pública y ha sido objeto de múltiples debates, tanto a favor como en contra. Recientemente se ha publicado una reelaboración de sus conclusiones, en la que prácticamente se mantienen las recomendaciones de aquel informe [8].

A raíz de la realización de este último informe, se puso de manifiesto que la dinámica de sistemas era algo más que la dinámica industrial o la dinámica urbana, y se convino adoptar la denominación de dinámica de sistemas, con la que se conoce actualmente.

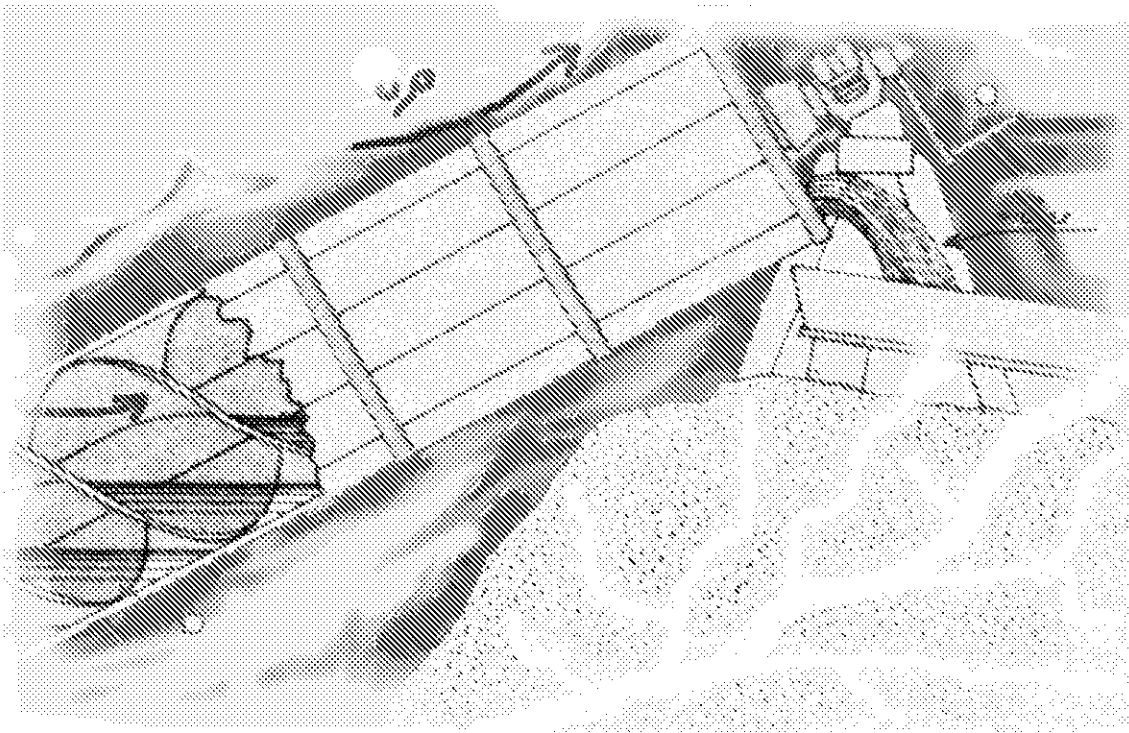
Los campos de aplicación de la dinámica de sistemas son muy variados. Durante sus más de 30 años de existencia se ha empleado para construir modelos de simulación informática en casi todas las ciencias. Por ejemplo, en sistemas sociológicos ha encontrado multitud de aplicaciones, desde aspectos más bien teóricos como la dinámica social de Pareto o de Marx [9], hasta cuestiones de implantación de la justicia [10]. Un área en la que se han desarrollado importantes aplicaciones es la de los sistemas ecológicos y medioambientales, en donde se han estudiado, tanto problemas de dinámica de poblaciones [11], como de difusión de la contaminación [12]. No es casual que, como hemos mencionado, esta metodología fuese empleada por el Club de Roma. Otro campo interesante de aplicaciones es el que suministran los sistemas energéticos, en donde se ha empleado para definir estrategias de empleo de los recursos energéticos [13] [14]. Se ha empleado también para problemas de defensa, simulando problemas logísticos de evolución de tropas y otros problemas análogos ([15], Capítulos 8 y 10).

Más allá de las aplicaciones concretas que acabamos de mencionar, la difusión de estas técnicas ha sido muy amplia, y en nuestros días se puede decir que constituye una de las herramientas sistémicas más sólidamente desarrolladas y que mayor grado de aceptación e implantación han alcanzado.

En las páginas que siguen vamos a hacer una presentación elemental de la dinámica de sistemas. De los cuatro Capítulos en que está dividida esta monografía, el primero ya lo está terminando el lector. Los dos siguientes se dedican a sentar las bases del lenguaje para la descripción de sistemas empleado en dinámica de sistemas. En el Capítulo 2 vamos a presentar los elementos básicos de un lenguaje sistémico, que nos van a permitir alcanzar un esbozo de su estructura, y especialmente de las estructuras básicas de realimentación subyacentes. El Capítulo 3 aporta los instrumentos con los que vamos a poder describir lo que es propiamente la dinámica de un sistema. El Capítulo 4 se dedica a exponer cómo se realiza en la práctica la explotación de ese lenguaje.

2

Estructura elemental de sistemas



2.1. Un lenguaje elemental para la descripción de sistemas

La descripción mínima de un sistema viene dada por la especificación de las distintas partes que lo forman, mediante el conjunto **C** de su composición, y por la relación **R** que establece cómo se produce la influencia entre esas partes. Veamos mediante un sencillo ejemplo cómo podemos analizar la estructura sistémica de un proceso. Supongamos el hecho elemental de llenar un vaso de agua. En la Figura 2 se muestra una ilustración gráfica de ese proceso. Su descripción, en lenguaje ordinario, es muy simple: el que llena el vaso de agua, mediante la observación del nivel alcanzado en el vaso, actúa sobre el grifo, de modo que lo va cerrando según se alcanza el nivel que estima oportuno. El proceso que tiene lugar lo describiríamos como sigue: el agente (el que llena el vaso) compara el nivel alcanzado en el vaso con el nivel deseado, si existe discrepancia actúa sobre el grifo, con lo que se influye sobre el nivel alcanzado, que es de nuevo comparado (en realidad se trata de un proceso continuo) con el nivel deseado; según disminuya la discrepancia, se irá cerrando el grifo, hasta que al anularse esta, se cierre definitivamente.

El proceso así descrito se puede representar de forma más sintética mediante un diagrama como el que se superpone en la Figura 3a. En este diagrama se indican los hitos más importantes que intervienen en el proceso, de acuerdo con la descripción anterior, y que son el nivel alcanzado en el vaso, la discrepancia entre ese nivel y el deseado, y el flujo de agua que modifica aquel nivel. Estos elementos básicos del proceso están unidos entre sí mediante flechas que indi-

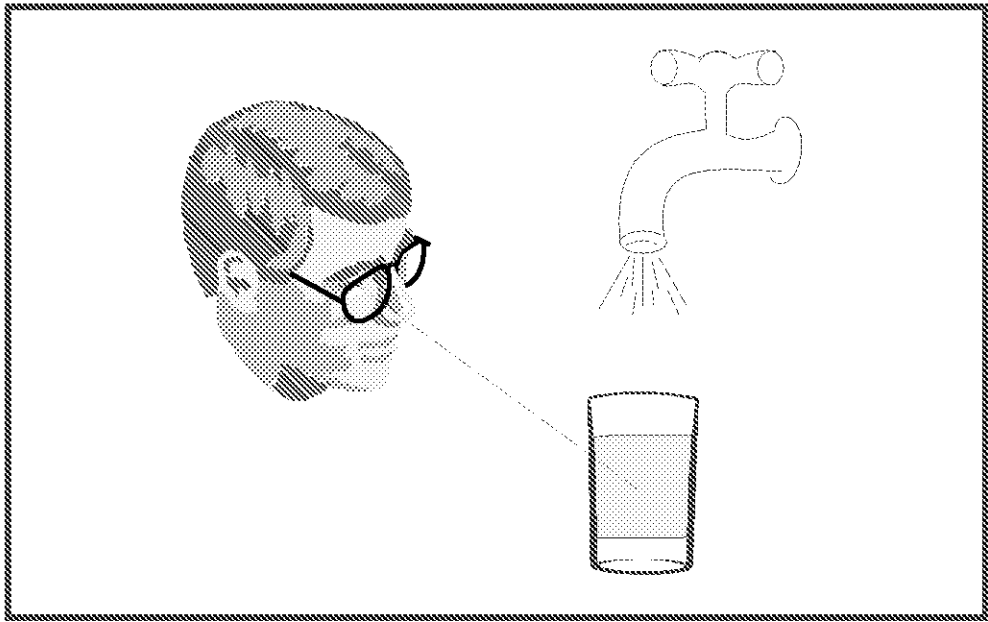


Figura 2. - PROCESO DE LLENAR UN VASO -

can las influencias que se establecen entre ellos. Por ejemplo, el nivel alcanzado depende del flujo de agua o, lo que es lo mismo, el flujo de agua influye sobre el nivel alcanzado, lo que se indica, en el diagrama, mediante una flecha que va desde «flujo de agua» a «nivel» alcanzado. Esta relación de influencia se escribe:

FLUJO DE AGUA → NIVEL

De forma análoga, la «discrepancia» se determina a partir del «nivel deseado» y del «nivel» alcanzado (en realidad es la diferencia entre ambas). Por último, la «discrepancia» determina el «flujo de agua». Articulando todas las relaciones de influencia se tiene el diagrama de la Figura 3a.

En esta figura se observa que las flechas que unen la discrepancia con el flujo de agua, éste con el nivel alcanzado, para acabar de nuevo en la discrepancia, forman una cadena circular o cerrada de

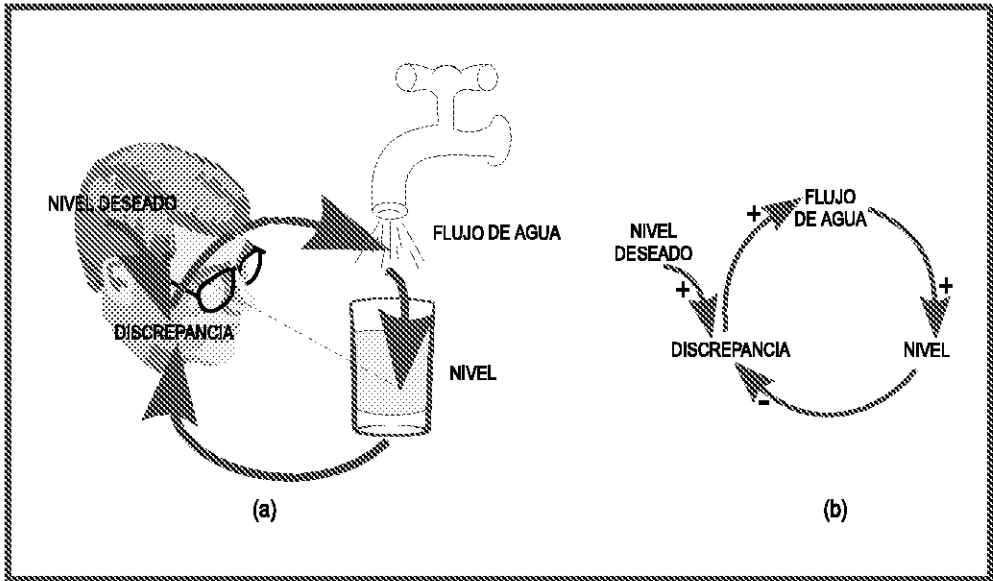


Figura 3. - DIAGRAMA BÁSICO DEL PROCESO DE LLENAR UN VASO DE AGUA: (a) CON UN GRAFO ORIENTADO; (b) CON UN GRAFO SIGNADO -

influencias. Es lo que se conoce como un *bucle de realimentación*, que es un elemento básico en la estructura del sistema y que trataremos con detalle en la Sección siguiente.

Este ejemplo constituye una muestra de cómo se puede analizar un sistema, descomponerlo en sus elementos esenciales, y relacionar estos elementos mediante un bosquejo de cómo se producen las influencias entre ellos. De este modo se tiene la descripción más elemental que podemos tener de ese sistema, que se limita a establecer qué partes lo forman y cuáles de ellas se influyen entre sí. La influencia, en esta descripción, se mantiene a un nivel cualitativo, en el sentido de que únicamente se dice si se produce o no influencia, pero no la forma o magnitud que tenga. En general, si **A** y **B** son dos partes de un sistema, el hecho de que **A** influya sobre **B** se representa mediante un flecha de la forma **A** → **B** e indica que **B** es una función de **A**, es decir $B = f(A)$, aunque no conozcamos la forma matemática exacta de la función.

El conjunto de las relaciones entre los elementos de un sistema recibe la denominación de *estructura* del sistema y se representa mediante el *diagrama de influencias* o causal. Emplearemos preferentemente la denominación diagrama de influencias para lo que en literatura clásica de dinámica de sistemas se conoce también como diagrama causal. Esta última denominación tiene connotaciones más fuertes y se considera menos apropiada. El diagrama de influencias de la Figura 3a constituye un ejemplo de la estructura de un sistema. La estructura juega un papel esencial en la determinación de las propiedades sistémicas.

En su forma más simple el diagrama de influencias está formado por lo que se conoce como un grafo orientado. A las flechas que representan las aristas se puede asociar un signo. Este signo indica si las variaciones del antecedente y del consecuente son, o no, del mismo signo. Supongamos que entre **A** y **B** existe una relación de influencia positiva

$$A \xrightarrow{+} B$$

Ello quiere decir que si **A** se incrementa, lo mismo sucederá con **B**; y, por el contrario, si **A** disminuye, así mismo lo hará **B**. Por otra parte, si la influencia fuese negativa a un incremento de **A** seguiría una disminución de **B**, y viceversa. De este modo, asociando un signo a las relaciones de influencia, se tiene un diagrama que suministra una información más rica sobre la estructura del sistema, aunque continúe conservando su carácter cualitativo. El grafo correspondiente se dice que está signado. En la Figura 3b se muestra el diagrama del proceso de llenar un vaso, con un grafo de este tipo.

2.1.1. *Bucle de realimentación negativa*

El proceso considerado en la Figura 2, al que se ha asociado el diagrama de influencias de la Figura 3, es un caso particular de la situación general que se considera en la Figura 4. En esta figura se tiene

que el estado alcanzado por una cierta magnitud (el nivel de agua en el ejemplo anterior) viene determinado por una acción (el flujo de agua) que a su vez es consecuencia de la discrepancia entre el estado alcanzado por esa magnitud y el valor que se pretende que tenga, que en la Figura 4 se denomina objetivo. Es decir, la discrepancia entre el estado y objetivo determina la acción que modifica el estado en el sentido de que alcance el objetivo deseado (que la discrepancia se anule).

El diagrama de la Figura 4 recibe la denominación de bucle de realimentación negativa, y representa un tipo de situación muy frecuente en el que se trata de decidir acciones para modificar el comportamiento con el fin de alcanzar un determinado objetivo. Un diagrama de esta naturaleza se puede aplicar tanto al sencillo acto de coger un lápiz, detectando mediante la vista la discrepancia entre las posiciones de la mano y del lápiz; al proceso de regulación de la temperatura en una habitación, en el que la discrepancia entre la temperatura deseada y la considerada confortable determina la actuación de un calefactor (si estamos en invierno) para corregir esa discrepancia (ver Figura 5); y tantos otros procesos de naturaleza semejante. El diagrama de un bucle de realimentación negativa aporta el esquema básico de todo comportamiento orientado a un objetivo. Su ubicuidad fue puesta de manifiesto por Norbert Wiener cuando, en el decenio de los años 40, sentó las bases de la *cibernética*.

Un bucle de realimentación negativa tiene la notable propiedad de que si, por una acción exterior, se perturba alguno de sus elementos, el sistema, en virtud de su estructura, reacciona tendiendo a anular esa perturbación. En efecto, consideremos el bucle de la Figura 6a, en el que los elementos se han representado, de forma general, mediante las letras **A**, **B** y **C**. Supongamos que uno cualquiera de ellos, por ejemplo el **B**, se incrementa. En virtud de las relaciones de influencia, el incremento de **B** determinará el de **C**, ya que la relación de influencia correspondiente es positiva. A su vez, el incremento de **C** determinará el decrecimiento de **A**, ya que así lo determina el carácter negativo de la influencia. El decrecimiento de **A** dará lugar al de **B**, pues la relación es positiva. Por tanto, el incremento inicial de **B** le «vuelve», a lo largo de la cadena de

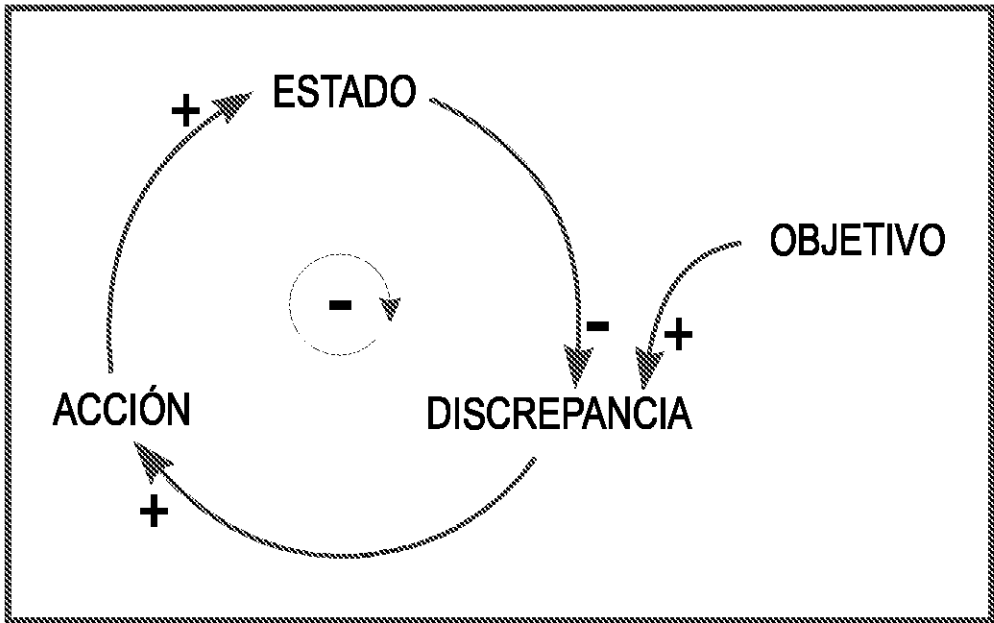


Figura 4. - DIAGRAMA BÁSICO DE UN BUCLE DE REALIMENTACIÓN NEGATIVA -

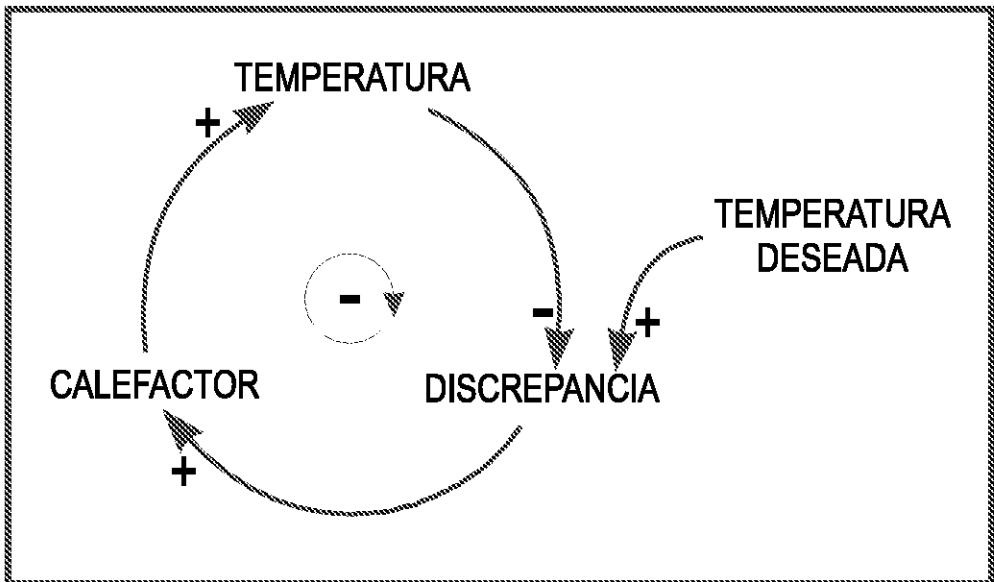


Figura 5. -ESTRUCTURA DE REALIMENTACIÓN NEGATIVA DEL PROCESO DE REGULACIÓN DE TEMPERATURA -

realimentación, como un decremento; es decir, la propia estructura de realimentación tiende a anular la perturbación inicial, que era un incremento, generando un decremento. De este modo se comprende que los bucles de realimentación negativa son bucles estabilizadores, que tienden a anular las perturbaciones exteriores. Por ello, los ingenieros que diseñan sistemas de regulación automática los incorporan en sus proyectos como elementos básicos para conseguir la acción reguladora (lo que logran mediante la adición de bucles de realimentación negativa a los procesos que diseñan). El efecto de un bucle de realimentación negativa es, por tanto, el tratar de conseguir que las cosas continúen como están, que no varíen. Son bucles que estabilizan los sistemas.

Es conveniente observar que en un bucle de realimentación negativa lo que se realimenta es información. El agente necesita información sobre los resultados de sus decisiones para adaptarlas a los resultados que esas acciones van produciendo. Más adelante, en la Sección 3.3, volveremos sobre este punto.

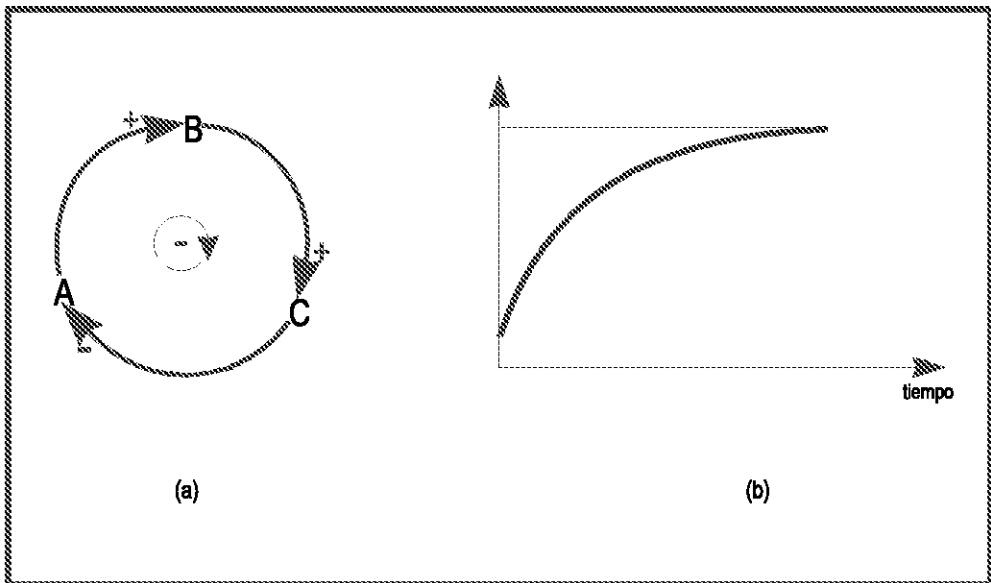


Figura 6. - ESTRUCTURA DE REALIMENTACIÓN NEGATIVA EN (a)
Y COMPORTAMIENTO CORRESPONDIENTE EN (b) -

2.1.2. Bucle de realimentación positiva

La otra forma que puede adoptar un bucle de realimentación es la que se muestra en la Figura 7, en la que se tiene un bucle de realimentación positiva. Se trata de un bucle en el que todas las influencias son positivas (o si las hubiese negativas, tendrían que compensarse por pares). En general la Figura 7 representa un proceso en el que un estado determina una acción, que a su vez refuerza este estado, y así indefinidamente. En este caso el estado es una población, y la acción su crecimiento neto. En tal caso, cuanto mayor sea la población, mayor es su crecimiento, por lo que a su vez mayor es la población, y así sucesivamente. Se tiene, por tanto, un crecimiento explosivo de la población.

En la Figura 8a se representa de forma esquemática, mediante las letras **A**, **B** y **C**, un bucle de esta naturaleza. Con ayuda de este diagrama se puede analizar, de forma general, el comportamiento que

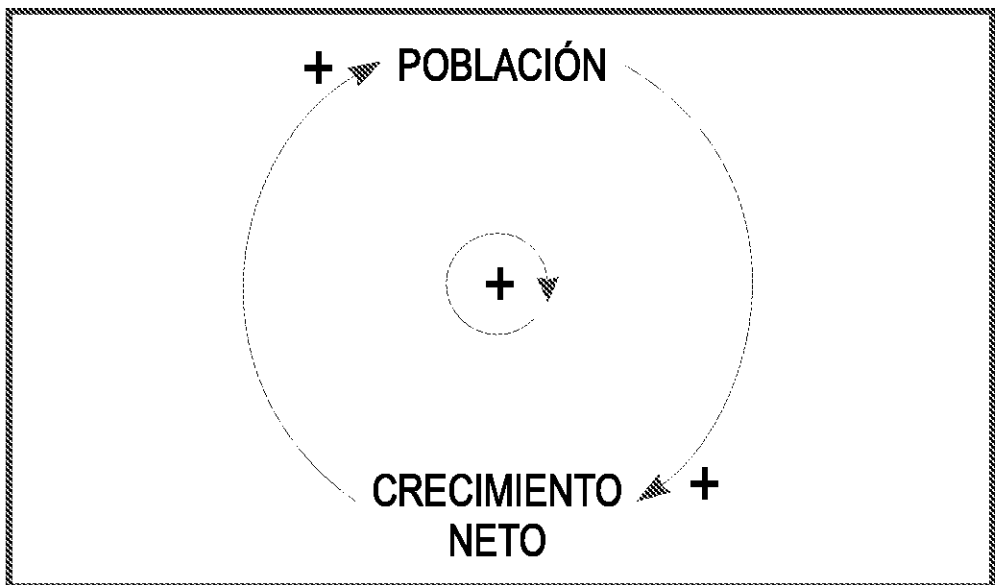


Figura 7. - EL CRECIMIENTO DE UNA POBLACIÓN COMO PROCESO DE REALIMENTACIÓN POSITIVA -

genera este bucle. Si cualquiera de sus elementos sufre una perturbación, ésta se propaga, reforzándose, a lo largo del bucle. En efecto, si **A** crece, entonces, en virtud del signo de la influencia, lo hará **B**, lo que a su vez determinará el crecimiento de **C** y, de nuevo, el de **A**. Por lo tanto, la propia estructura del sistema determina que el crecimiento inicial de **A** «vuelva» reforzado a **A**, iniciándose de este modo un proceso sin fin que determinará el crecimiento de **A** (Figura 8b). Este efecto se conoce vulgarmente como «círculo vicioso» o «bola de nieve». El cambio se amplifica produciendo más cambio.

Se trata, por tanto, de una realimentación que amplifica las perturbaciones y que, por tanto, inestabiliza al sistema. En este sentido se puede decir que su efecto es contrario al de la realimentación negativa. Si aquella estabilizaba, esta desestabiliza.

Antes de terminar con esta presentación elemental de los bucles de realimentación positiva y negativa debe quedar bien claro que

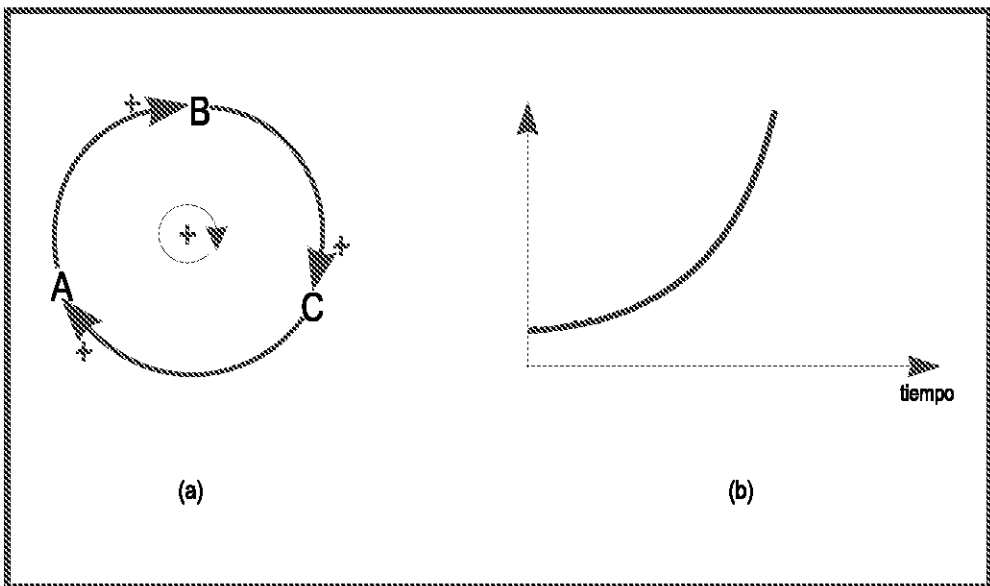


Figura 8. - ESTRUCTURA DE REALIMENTACIÓN POSITIVA EN (a)
Y COMPORTAMIENTO CORRESPONDIENTE EN (b) -

el comportamiento asociado a estos bucles, sea el comportamiento autorregulador del bucle de realimentación negativa o el comportamiento explosivo del positivo, son modos de comportamiento que cabe imputar a la estructura del sistema, y no a las partes que lo forman. Recuérdense las Figuras 6 y 8 que nos han suministrado el esquema básico de estos bucles de realimentación. Con estas Figuras hemos podido entender el comportamiento correspondiente, prescindiendo de los elementos concretos que representasen **A**, **B** y **C**. En este sentido decimos que los bucles de realimentación son elementos básicos para la generación endógena (desde dentro del propio sistema) del comportamiento.

2.1.3. Retrasos

Hemos visto como la información sobre las relaciones de influencia podía enriquecerse con la adición de un signo. En algunos casos interesa, además, distinguir entre influencias que se producen de forma más o menos instantánea e influencias que tardan un cierto tiempo en manifestarse. En este último caso, se tienen influencias a las que se asocian retrasos. En el diagrama de influencias, si **A** influye sobre **B**, y esta influencia tarda un cierto tiempo en manifestarse, entonces se añaden dos trazos sobre la flecha correspondiente. En la Figura 9a se muestra un bucle de realimentación negativa en el que la influencia entre **C** y **A** se produce con un retraso, por lo que la flecha correspondiente presenta dos trazos.

Los retrasos pueden tener una enorme influencia en el comportamiento de un sistema. En los bucles de realimentación positiva determinan que el crecimiento no se produzca de forma tan rápida como cabría esperar. En los de realimentación negativa su efecto es más patente. Su presencia puede determinar que ante la lentitud de los resultados se tomen decisiones drásticas que conduzcan a una oscilación del sistema. Así en la Figura 9b se muestra el posible comportamiento del sistema de la Figura 9a, en el que se produce una oscila-

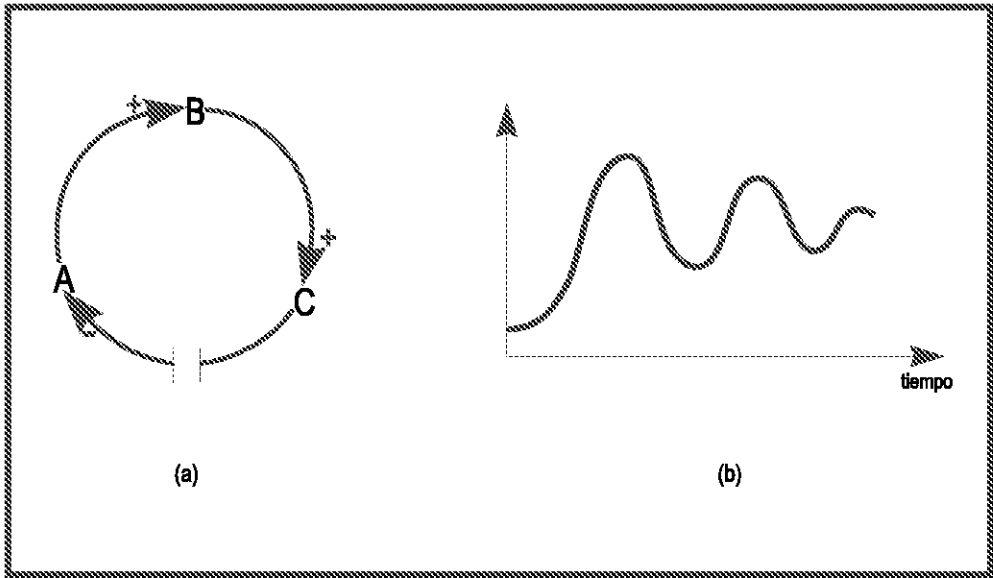


Figura 9. - BUCLE DE REALIMENTACIÓN NEGATIVA CON UN RETRASO Y COMPORTAMIENTO CORRESPONDIENTE -

ción en torno a la meta perseguida. Precisamente, el análisis de estas oscilaciones en una empresa con retrasos en la transmisión de información se encuentra en los orígenes de la dinámica de sistemas.

2.1.4. Sistemas complejos y estructuras genéricas

Los bucles de realimentación positiva y negativa constituyen los ejemplos más simples de estructura de un sistema capaces de generar comportamiento de forma autónoma. Sin embargo, los sistemas con los que habitualmente nos encontramos no es frecuente que admitan una descripción en la que aparezca exclusivamente una de esas estructuras. Por el contrario, lo habitual es que nos encontremos con sistemas complejos en los que coexistan múltiples bucles de realimentación, tanto positivos como negativos. En tal caso el comportamiento resultante dependerá de cuáles de los bucles sean dominantes en cada momento.

El ejemplo más simple de un sistema con varios bucles de realimentación es el que se muestra en la Figura 10, en el que se tiene una estructura en la que coexisten un bucle de realimentación positiva con uno negativo. Existen muchos procesos en la realidad a los que es aplicable este diagrama. Se trata de procesos en los que inicialmente se produce un crecimiento; es decir, al principio el bucle de realimentación positiva es el dominante. Sin embargo, sabemos que todo proceso de crecimiento tarde o temprano debe cesar. No hay un crecimiento indefinido. Este efecto limitador del crecimiento se incorpora mediante un bucle de realimentación negativa, como el que se muestra a la derecha de la Figura 10. Cuando el estado ha alcanzado un considerable nivel de crecimiento, como consecuencia de que el bucle de realimentación positiva es dominante, se invierte la dominancia de los bucles, de modo que el nuevo bucle dominante es el negativo y se produce la limitación del crecimiento.

Todo sucede como si se combinase el crecimiento asociado a un bucle de realimentación positiva (recuérdese la Figura 8b), en la

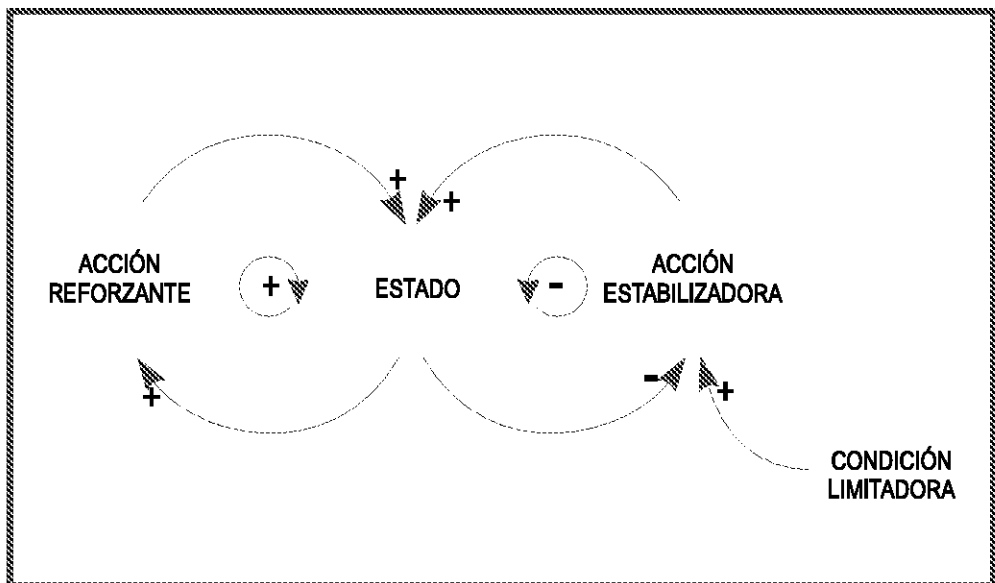


Figura 10. - ESTRUCTURA FORMADA POR DOS BUCLES DE REALIMENTACIÓN, UNO POSITIVO Y OTRO NEGATIVO -

fase inicial del proceso, con el comportamiento asintótico correspondiente a un bucle de realimentación negativa (Figura 6b), en la fase terminal. En la Figura 11 se muestra la combinación de estos dos modos de comportamiento, que da lugar a la conocida curva de crecimiento logístico o sigmoïdal.

El número de procesos a los que se puede aplicar esta estructura de dos bucles es muy amplio y comprende desde la introducción de un nuevo producto en un mercado (con una fase inicial de implantación y gran crecimiento, y una fase final de saturación) hasta la introducción de una nueva población en un hábitat en el que inicialmente estaba ausente. La estructura de la Figura 10 permite dar una interpretación estructural del comportamiento que aparece en la Figura 11. De este modo vamos viendo cómo es posible asociar estructura y comportamiento, que ya hemos dicho que es el objetivo fundamental de la dinámica de sistemas. Sin embargo, por el momento, lo estamos haciendo de forma eminentemente cualitativa. En el próximo Capítulo

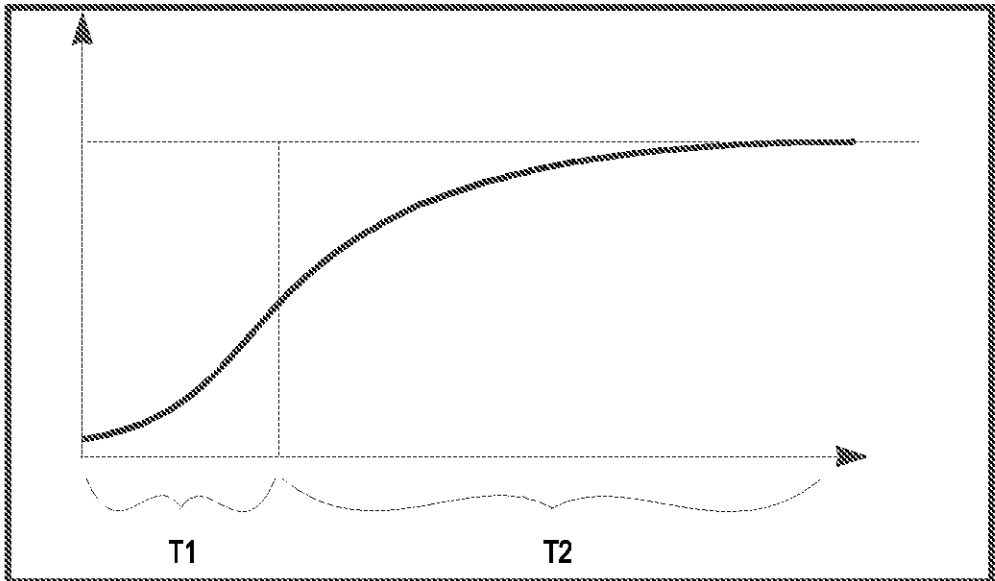


Figura 11. - COMPORTAMIENTO SIGMOÏDAL DE UN PROCESO CON DOS BUCLES DE REALIMENTACIÓN, UNO POSITIVO Y OTRO NEGATIVO -

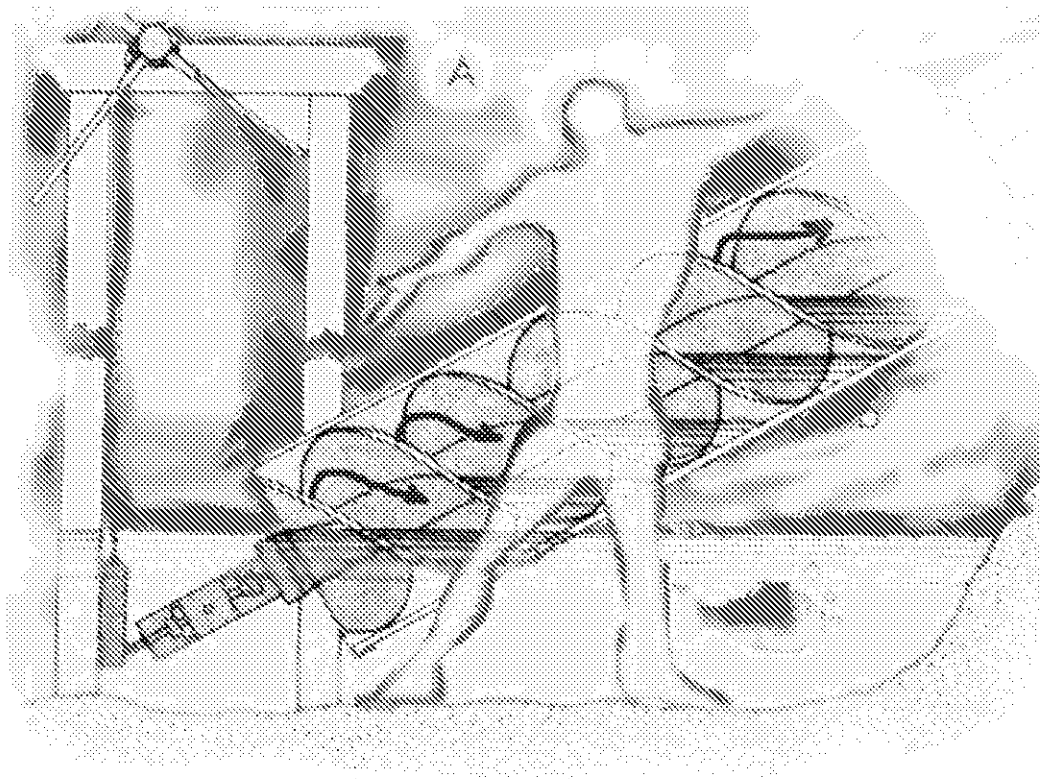
veremos cómo efectivamente se pueden obtener los comportamientos, como el de la Figura 11, a partir de estructuras, como las de la Figura 10.

La estructura que se ha representado en la Figura 10 constituye un ejemplo de lo que se conoce como *arquetipos sistémicos* o *estructuras genéricas*. Se trata de situaciones típicas que aparecen en problemas muy variados, pero que admiten la misma descripción básica desde un punto de vista sistémico. Aquí hemos presentado una de las más sencillas, pero en la literatura se encuentra un gran número de ellas. Una presentación más completa de los arquetipos sistémicos puede verse en el libro de Senge, *La quinta disciplina* [16].

En dinámica de sistemas clásica las únicas estructuras básicas que se consideran son las de realimentación. Ello es debido a que se trabaja con un alto grado de agregación y se prescinde normalmente de la estructura espacial del sistema considerado. Cuando esto no es así, e interesa analizar la organización en el espacio, entonces la consideración exclusiva de la estructura de realimentación deja de ser suficiente. Hay que recurrir a otra estructura, que es la de reacción-difusión, que permite dar cuenta de cómo se produce la ordenación espacial en el seno de un sistema. La consideración de esta estructura excede los límites impuestos a esta monografía (ver [17], Capítulo 8).

3

De la estructura al comportamiento



3.1. Introducción

En el capítulo anterior se ha presentado un lenguaje sistémico que aporta los elementos básicos para una descripción esquemática de un sistema. De acuerdo con esta descripción, un sistema se reduce a una serie de elementos entre los que se producen influencias. La descripción se traduce en un grafo, de los que hemos visto algunos ejemplos en ese capítulo.

Hemos visto también cómo a determinadas estructuras se asociaban modos de comportamiento. Por ejemplo, se ha mostrado que a un bucle de realimentación positiva, tal como el de la Figura 6a, se puede asociar un comportamiento caracterizado por el crecimiento, como el de la Figura 6b. Pero ello lo hemos hecho a partir de consideraciones meramente cualitativas, sin disponer de instrumentos para determinar exactamente la curva de crecimiento de la Figura 6b.

En este Capítulo vamos a presentar instrumentos adicionales que nos van a permitir reelaborar los diagramas de influencias para convertirlos en unos objetos matemáticos más ricos, que reciben la denominación de sistemas dinámicos, y que programados en un computador (adoptaremos este término para lo que también se conoce como ordenador) permitirán generar las trayectorias que representan el comportamiento de los sistemas.

3.2. Génesis del comportamiento en un diagrama de influencias

La estructura de un sistema, tal como se ha presentado en el Capítulo anterior, puede aparentar tener un carácter esencialmente estático aunque, sin embargo, hemos visto cómo permitía conjeturar el comportamiento del sistema ante perturbaciones exteriores. Ahora cabe preguntarse cómo dar razón de la generación endógena del comportamiento. A ello vamos a dedicar esta Sección. Partiremos de la observación de que entre los distintos elementos que aparecen en los nodos de un diagrama de influencias, algunos representan variaciones con respecto al tiempo de otras magnitudes consideradas en ese mismo diagrama. Por ejemplo, en el diagrama de la Figura 3 la variable flujo de agua representa la variación con respecto al tiempo del nivel alcanzado por el fluido en el vaso. Recordando esa figura se tiene:

FLUJO \longrightarrow NIVEL

Esta influencia es un caso particular de otra más general que podemos expresar de la forma:

$$\frac{dX}{dt} \rightarrow X \quad (3.1)$$

En la que dX/dt denota la variación con respecto al tiempo de la magnitud X . Esta expresión representa una relación trivial: la variación con respecto al tiempo de X influye en el crecimiento de la propia variable X . Sin embargo, lo que interesa por el momento resaltar es que la existencia, en el diagrama de influencias, de variables que representan la variación con respecto al tiempo de otras, comporta que estas últimas varíen a lo largo del tiempo. En este sencillo hecho se basa el que podamos decir que en la estructura está implícito el comportamiento del sistema.

Conviene también observar que siempre que tengamos una variable del tipo dX/dt , que representa la variación de una magnitud X con respecto al tiempo, se tendrá una relación de influencia como la

de la expresión (3.1). La variable \mathbf{X} resulta de la acumulación del cambio implícito en la variable $d\mathbf{X}/dt$. Por tanto, siempre que aparezca una variable como la $d\mathbf{X}/dt$ aparecerá una \mathbf{X} , y entre ambas se establecerá una relación como la (3.1). Por analogía con el ejemplo de la Figura 3, la variable \mathbf{X} se denomina *variable de nivel* y la variable $d\mathbf{X}/dt$ *variable de flujo*. En la literatura matemática a la variable de nivel se la conoce también como *variable de estado*.

Las anteriores consideraciones nos llevan a postular una clasificación de las distintas variables que aparecen en un diagrama de influencias en tres grupos: variables de nivel o estado, variables de flujo y variables auxiliares. Las variables de nivel son normalmente las variables más importantes y representan esas magnitudes cuya evolución es especialmente significativa. Asociada a cada variable de nivel se encuentran una o varias variables de flujo, que determinan su variación a lo largo del tiempo. Por último, las variables auxiliares son el resto de las variables que aparecen en el diagrama, y representan pasos intermedios para la determinación de las variables de flujo a partir de las variables de nivel.

Si somos capaces de realizar esa clasificación vamos a poder dar un paso de significación considerable para llegar a una descripción del sistema más formalizada. Un ejemplo nos permitirá ilustrar lo que estamos diciendo. Para ello vamos a considerar el proceso de difusión de una infección en una población inicialmente sana. Esta población sufre el efecto de una epidemia, de modo que, mediante una tasa de contagio, la enfermedad se va propagando hasta infectar a toda la población. La descripción del proceso, en lenguaje ordinario, se puede reducir a los cuatro enunciados siguientes:

- R_1 : cuanto más grande es la tasa de contagio, mayor es la población infectada;
 - R_2 : a su vez, cuanto mayor es la población infectada más grande será la tasa de contagio (la infección se difundirá a mayor velocidad);
-

- R_3 : por otra parte, cuanto mayor es la población infectada menor será la población aún vulnerable; y,
- R_4 : cuanto mayor sea la población vulnerable a la epidemia, mayor será la tasa de contagio.

Estos enunciados, que constituyen la descripción básica del proceso, se pueden convertir en relaciones de influencia entre las diferentes variables con las que se puede describir el proceso. Estas variables son: la población infectada **PI**, la tasa de contagio **TC** y la población vulnerable a la enfermedad **PV**. Entre estas variables, de acuerdo con los anteriores enunciados, se pueden establecer las relaciones de influencia:

$$\begin{array}{l}
 R_1 : \text{TC} \xrightarrow{+} \text{PI} \\
 R_2 : \text{PI} \xrightarrow{+} \text{TC} \\
 R_3 : \text{PI} \xrightarrow{-} \text{PV} \\
 R_4 : \text{PV} \xrightarrow{+} \text{TC}
 \end{array}$$

El conjunto de estas relaciones conduce al diagrama integrado que se muestra en la Figura 12. En este diagrama se pone de manifiesto que el proceso posee una estructura con dos bucles de realimentación, uno positivo y otro negativo. En el Capítulo anterior hemos considerado estructuras de este tipo. De momento, sin embargo, lo que interesa es resaltar cómo los enunciados básicos del proceso han conducido a un diagrama de influencias. Estos enunciados básicos, en un caso real de modelado, corresponderían al conocimiento disponible con relación al proceso que se trata de modelar, y normalmente será facilitado por los especialistas en ese tipo de procesos. En la literatura clásica de dinámica de sistemas es frecuente referirse a este conjunto de enunciados como al modelo mental de los correspondientes especialistas. El diagrama de la Figura 12 constituye una descripción del proceso que se está estudiando en el lenguaje sistémico que se ha desarrollado en el Capítulo anterior.

Interesa ahora clasificar los distintos elementos que aparecen en el diagrama de la Figura 12 en los tres tipos de variables propuestos: niveles, flujos y auxiliares. Para ello, en primer lugar,

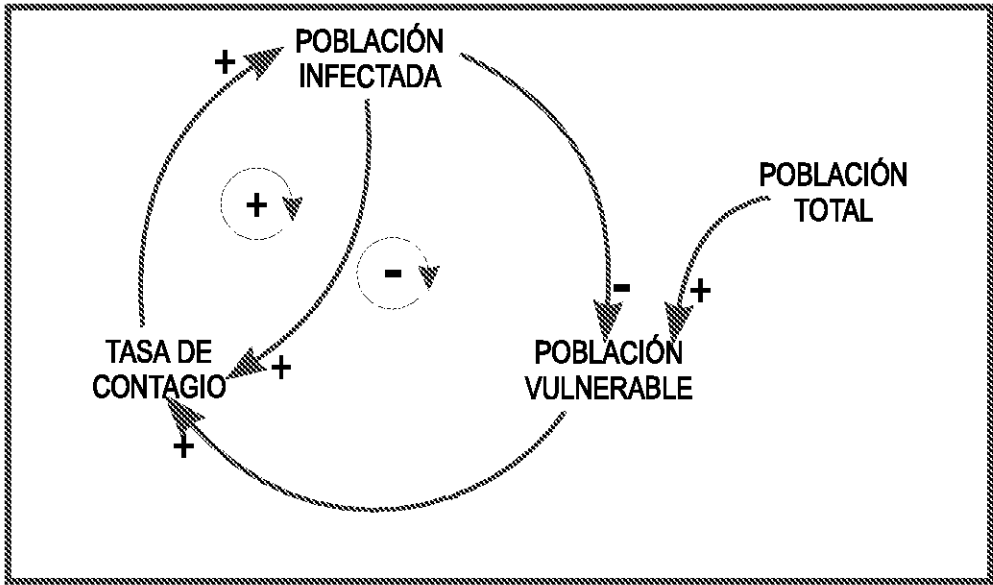


Figura 12. - DIAGRAMA DE INFLUENCIAS DEL PROCESO DE PROPAGACIÓN DE UNA EPIDEMIA -

deben identificarse las variables de nivel del proceso en cuestión. En este caso es fácil ver que existe una única variable de nivel que corresponde a la población infectada **PI**. La tasa de contagio es una variable de flujo, ya que su significado es precisamente el de la variación de la población infectada con respecto al tiempo. Es decir la influencia

$$\text{TASA DE CONTAGIO} \xrightarrow{+} \text{POBLACION INFECTADA}$$

es de la forma (3.1) y por tanto a la población infectada **PI** le corresponde el carácter de variable de nivel **X** y a la tasa de contagio **TC** el de flujo dX/dt . Algunos autores proponen realizar un análisis dimensional para llevar a cabo la identificación de las variables de nivel y de flujo. En efecto, en la expresión (3.1) tenemos una relación de influencia en la que el consecuente viene medido en unas ciertas unidades y el antecedente en esas mismas unidades partidas por tiempo.

A las variables de nivel y de flujo se asocian unos iconos (gráficos) como los que se indican en la Figura 13, en la que a una variable de nivel se asocia un rectángulo y a una de flujo un icono que recuerda una válvula, cuya apertura se regula precisamente mediante el flujo que representa esta variable. En la literatura se encuentran las dos formas de representar las variables de flujo que se indican en la Figura 13.

Las variables auxiliares se representan mediante círculos. El diagrama que se obtiene a partir de un diagrama de influencias, clasificando sus nodos en variables de nivel, flujo o auxiliares y asociando a esos nodos los iconos correspondientes recibe la denominación de diagrama de Forrester o diagrama de flujos-niveles.

En la Figura 14 se tiene el diagrama de Forrester del proceso de difusión de una enfermedad. Este diagrama se ha obtenido particularizando los elementos que aparecen en el de la Figura 12, convirtiendo cada uno de ellos en una variable de estado, de flujo o auxiliar.

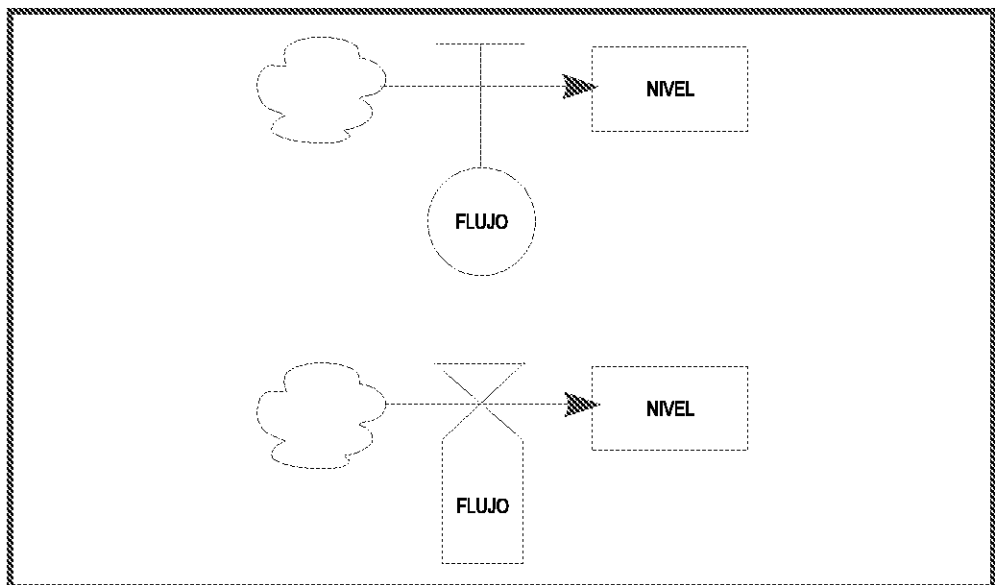


Figura 13. - REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS VARIABLES DE NIVEL Y DE FLUJO EN EL DIAGRAMA DE FORRESTER -

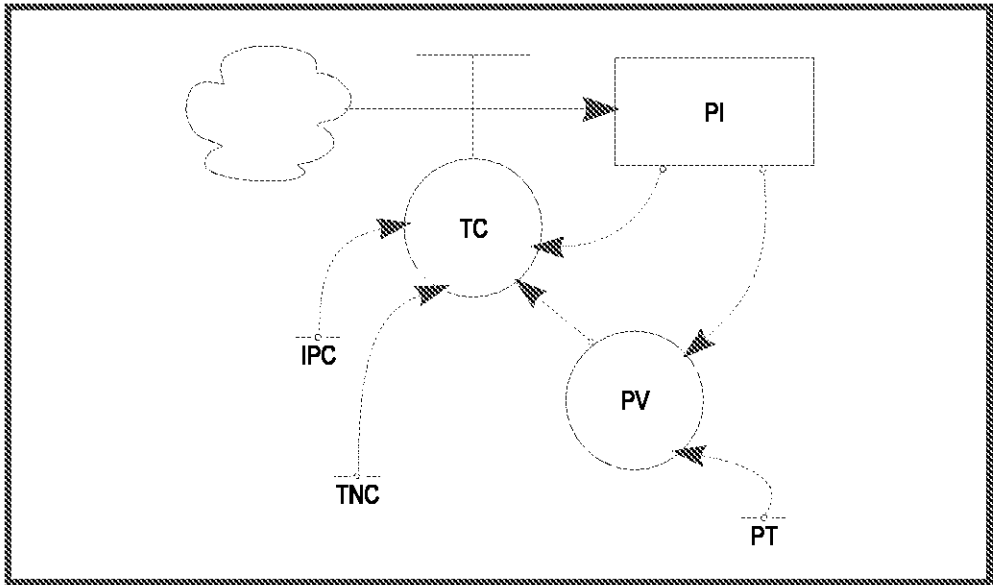


Figura 14. - DIAGRAMA DE FORRESTER DEL PROCESO DE LA PROPAGACIÓN DE UNA EPIDEMIA -

Ya hemos identificado la variable **PI** como de nivel y la **TC** como de flujo. La restante **PV** es una variable auxiliar, ya que representa un paso intermedio en la determinación de **TC** a partir de **PI**. Además, en la Figura 14 se indican mediante los símbolos **IPC**, **TNC** y **PT** las constantes que representan a las infecciones por contagio, la tasa normal de contagio y la población total, respectivamente. Por último, en la misma Figura, aparece, en el extremo superior izquierdo, una nube que representa una fuente, o un sumidero, que no es relevante para la descripción del sistema. Se podría prescindir de él pero se incluye para dar mayor coherencia al diagrama.

Veamos cómo al diagrama de Forrester se asocian, a su vez, las ecuaciones funcionales del modelo. En primer lugar, consideremos la relación entre la tasa de contagio **TC** y la población infectada **PI**. La evolución de esta población viene dada por la expresión

$$PI(T + \Delta t) = PI(t) + \Delta t * TC \quad (3.2)$$

que indica que la población infectada **PI** en el instante de tiempo $t + \Delta t$ se obtiene sumando a la población infectada que existía en el tiempo t los contagios que se han producido en el período de tiempo entre t y $t + \Delta t$. La ecuación anterior recibe la denominación de *ecuación de nivel o de estado*, e indica cómo evoluciona la variable de estado **PI** en función del flujo **TC** que determina su variación. Esta ecuación se puede escribir también, empleando notación diferencial, de forma alternativa:

$$\frac{dPI}{dt} = TC(t) \quad (3.3)$$

La tasa de contagio **TC** se determina con ayuda de la expresión:

$$TC(t) = IPC * TNC * PI(t) * PV(t) \quad (3.4)$$

que establece que esa tasa de contagio se obtiene multiplicando las infecciones por contagio **IPC**, la tasa normal de contagio **TNC**, la población infectada **PI** y la población vulnerable **PV**. Esta ecuación es una muestra de lo que se conoce como una ecuación de flujo. Las ecuaciones de este tipo permiten determinar una variable de flujo a partir de determinados parámetros del modelo (en este caso **IPC** y **TNC**), de variables auxiliares (como **PV**) y/o de variables de estado (como **PI**). Los parámetros **IPC** y **TNC** toman valores constantes para cada simulación del modelo.

En el modelo aparece también la variable auxiliar población vulnerable **PV**, que viene dada por:

$$PV = PT - PI \quad (3.5)$$

es decir, como diferencia entre la población vulnerable **PV** y la población infectada **PI**.

En la Tabla 1 se reúne el conjunto de las expresiones (3.2), (3.4) y (3.5) que constituyen una descripción matemática del proceso de difusión de una enfermedad. Cada ecuación se asocia a la relación R_i de la descripción verbal del proceso.

R_1	$PI(t + \Delta t) = PI(t) + \Delta t * TC$
R_2 y R_4	$TC = IPC * TNC * PI * PV$
R_3	$PV = PT - PI$

TABLA 1 - RELACIONES QUE FORMAN LA DESCRIPCIÓN VERBAL Y ECUACIONES DEL MODELO -

Conviene observar que en el modelo además de la variable de estado **PI**, el flujo **TC** y la variable auxiliar **PT** también han aparecido unos parámetros **IPC** y **TNC** y una variable exógena **PV**. A los parámetros hay que darles un valor numérico para que el modelo se refiera a una situación concreta. Ello se hace habitualmente de una de las dos formas siguientes:

1. Bien se atiende al significado concreto de esos parámetros, y se dispone de información numérica suficiente para conocer sus valores. En este caso, se requeriría el conocimiento del número de infecciones por contagio, que nos daría el parámetro **IPC**, y de la tasa normal de contagio **TNC**. Esta información será suministrada por los correspondientes especialistas.
2. O bien, en los casos en los que no se disponga de información sobre los valores de los parámetros, pero sin embargo se disponga de datos con relación a la evolución de las magnitudes significativas del sistema en un período de tiempo determinado, se puede emplear técnicas de ajuste de los parámetros. Estas técnicas consisten, esencialmente, en determinar los valores numéricos de los parámetros que minimizan algún índice que mida la discrepancia entre los datos históricos de evolución del proceso y los generados por el sistema dinámico.

Resulta interesante observar que hasta la escritura de las expresiones de la Tabla 1, o lo que es lo mismo del diagrama de Forrester, la única información que se ha considerado es de naturaleza cualitativa. La información cuantitativa se emplea posteriormente para asignar valores numéricos a los parámetros que intervienen en esas expresiones.

El ejemplo que acabamos de ver muestra los elementos básicos en la descripción de un sistema. Sin embargo, en este ejemplo falta un elemento muy importante: la función tabla. Esta función permite representar dependencias no lineales entre variables. Por ejemplo, supongamos que la variable auxiliar **B** es función de **A**, mediante una expresión de la forma $B = f(A)$. Supongamos que la función f tiene la forma que se indica en la Figura 15. Es habitual que esta función se defina mediante una tabla de valores correspondientes a determinados valores de **A**. A ello obedece la denominación de función tabla. En un diagrama de Forrester se representa mediante un círculo, tal como se indica en la

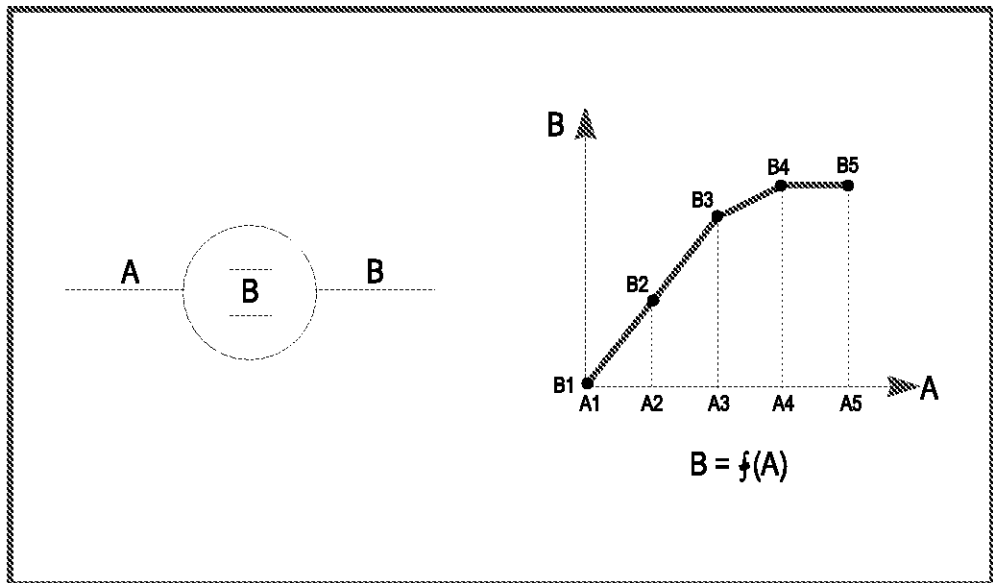


Figura 15. - REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS FUNCIONES TABLA EN EL DIAGRAMA DE FORRESTER -

Figura 15. Desde un punto de vista matemático es importante observar que mediante las funciones tablas se describen las no-linealidades del sistema que vienen dadas por puntos. Además, pueden tenerse no-linealidades mediante expresiones analíticas.

Con ello ya hemos completado el conjunto de símbolos que se emplea en un diagrama Forrester, y que se reúnen en la Figura 16.

El lector con formación matemática habrá entendido que si llevamos las expresiones (3.4) y (3.5) a (3.3), hacemos $\mathbf{x} = \mathbf{PI}$, $\mathbf{v} = \mathbf{PT}$ y englobamos en \mathbf{p} el producto de los parámetros $\mathbf{IPC} * \mathbf{TNC}$ del modelo, podemos escribir:

$$\frac{dx}{dt} = px(v - x) \quad (3.6)$$

Esta expresión es del tipo:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, p) \quad (3.7)$$

que representa lo que los matemáticos conocen como un *sistema dinámico*. Con ello se pone de manifiesto que un modelo de dinámica de sistemas es un sistema dinámico.

Con lo visto hasta aquí hemos completado el proceso mediante el cual a partir de un diagrama de influencias, que representa la descripción más elemental que podemos hacer de un sistema, hemos sido capaces de obtener el diagrama de Forrester, especializando los distintos elementos que aparecen en aquel, a partir del cual tenemos un objeto matemático muy elaborado, que es un sistema dinámico, el cual puede ser programado en un computador. Para ello se recurre a lenguajes o entornos informáticos de simulación adecuados. Aunque la programación de un modelo como el que se tiene en la Tabla 1 puede hacerse en cualquier lenguaje de alto nivel, resulta más cómo-

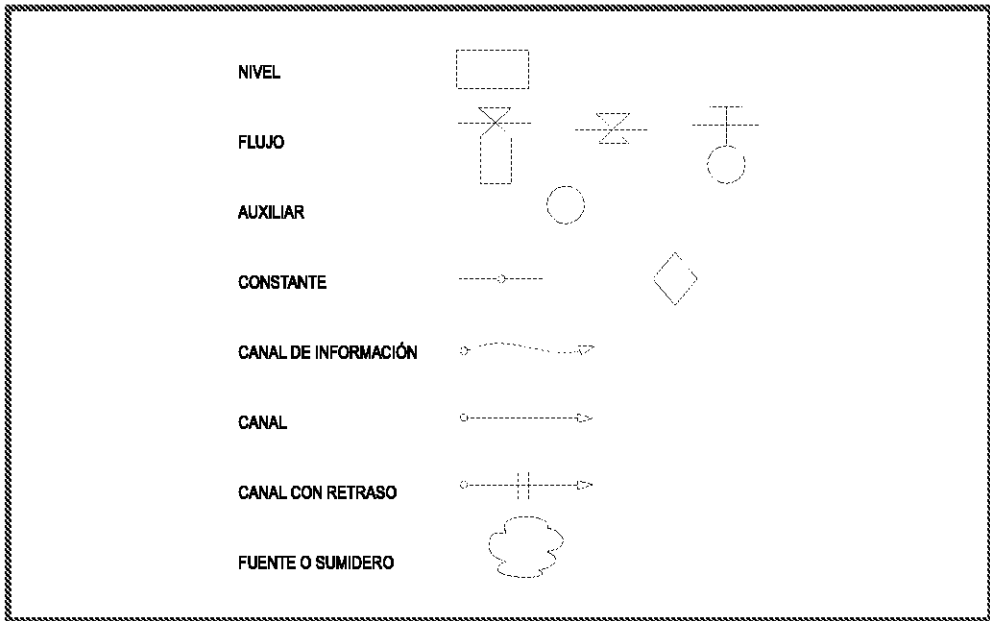


Figura 16. - SÍMBOLOS EMPLEADOS EN LOS DIAGRAMAS DE FORRESTER -

do emplear los que se han desarrollado al efecto. El más clásico empleado en dinámica de sistemas es el DYNAMO. Con ayuda de este lenguaje, el modelo que estamos viendo se programaría como sigue:

```

* * Difusión de una epidemia * *
l      pi.k = pi.j+dt * tc.jk
n      pi = 10
r      tc.kl = ipc * tcn * pi.k * pv.k
c      ipc = 0.15
c      tcn = 0.025
a      pv.k = pt - pi.k
c      pt = 100
save  pi, pv, tc
spec  dt = 0.25/length = 40/savper = 1

```

Si se comparan las líneas de este programa con las de la Tabla 1 se verá que resultan muy fáciles de entender. En cada línea, a la

izquierda, aparece una letra que representa el tipo de la ecuación: **l** si se trata de una ecuación de nivel; **r** si lo es de flujo; **a** si es una auxiliar; **c** para indicar una constante; y **n** para las condiciones iniciales de una variable de nivel. Para indicar los instantes de tiempo se emplean las letras **i**, **j** y **k**, después de un punto, tras la correspondiente variable. Por ejemplo, **pi.k** representa el valor de **pi** en el tiempo **k**. El empleo de dos letras representa el incremento de la variable entre los instantes de tiempo correspondiente. Así **tc.kl** es el valor de la tasa de crecimiento **tc** en el intervalo de tiempo entre **k** y **l**. Las dos últimas líneas del programa se refieren a especificaciones como el tiempo de integración, qué variables se quieren almacenar y similares. Con estas indicaciones es fácil leer el programa del modelo.

En la actualidad se dispone de entornos de simulación muy flexibles que permiten construir un modelo de forma gráfica, en la pantalla del ordenador, empleando iconos, de modo que, combinando éstos, se llega al diagrama de Forrester de forma directa. Estos entornos, una vez se ha construido este diagrama en la pantalla, generan automáticamente las ecuaciones. En la Figura 17 se muestra el tratamiento del modelo que estamos considerando en el entorno PowerSim.

Una vez programado el computador se generan las trayectorias del sistema, que muestran la evolución de las variables correspondientes, especialmente de los niveles (Figura 18). Por lo que respecta a nuestro modelo, se observa que la población infectada **PI** muestra un crecimiento sigmoïdal. Ello no debe extrañarnos, después de lo que habíamos visto en la Sección 2.1.3 del Capítulo anterior. En efecto, vimos allí cómo un sistema cuya estructura presentase dos bucles de realimentación, uno positivo y otro negativo, mostraba un comportamiento de crecimiento sigmoïdal. El proceso de difusión de una enfermedad, que estamos analizando ahora, muestra esa estructura, según hemos visto en la Figura 12. En la fase inicial del proceso, cuando las personas que han padecido la enfermedad son pocas, se produce un proceso de crecimiento exponencial

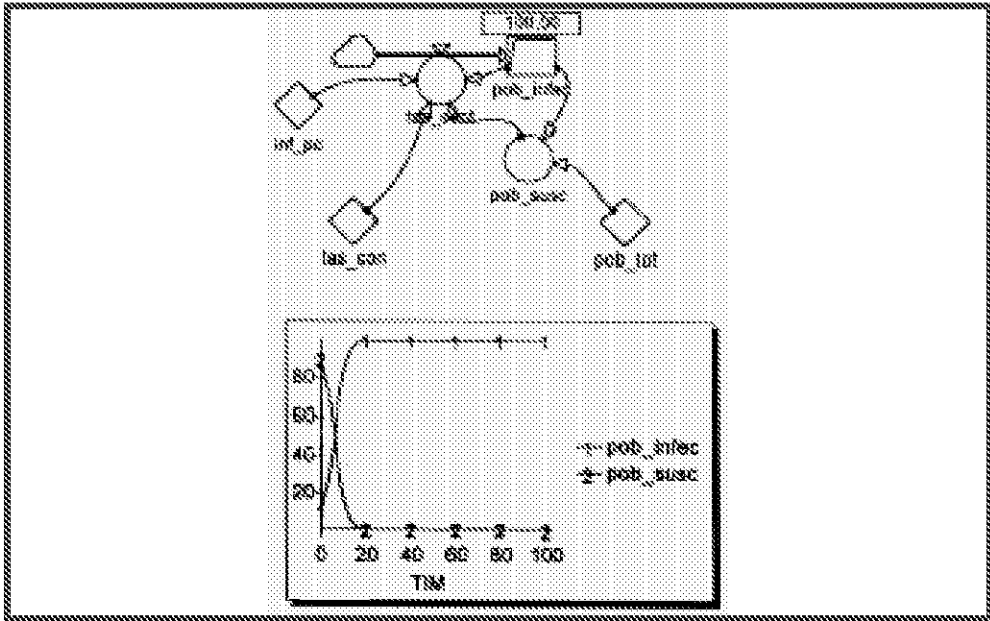


Figura 17. - SALIDA DEL POWERSIM -

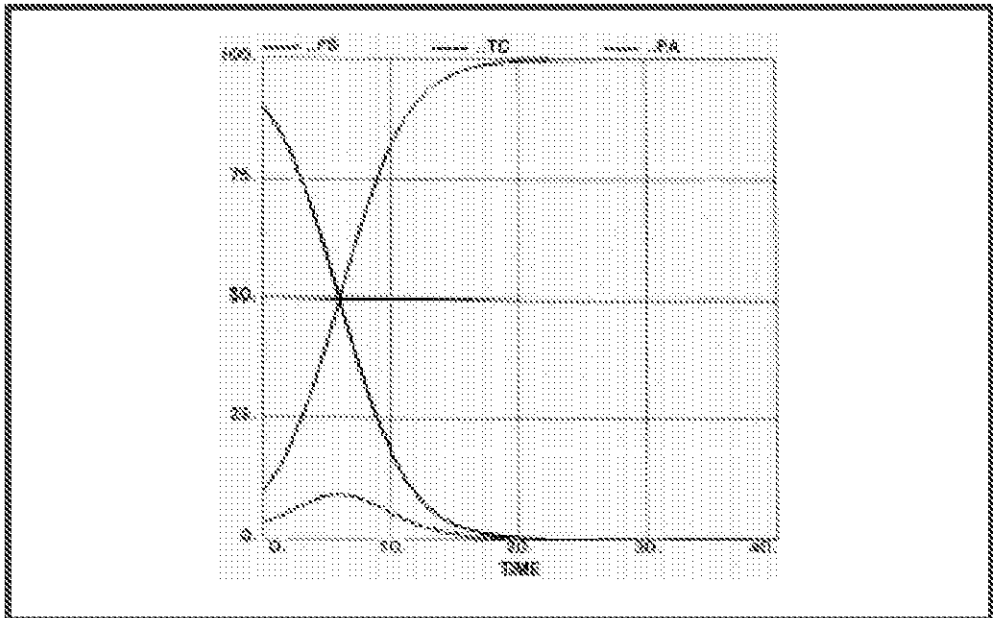


Figura 18. - TRAYECTORIAS DEL MODELO DE LA PROPAGACIÓN DE UNA EPIDEMIA -

de difusión de la enfermedad. El bucle de realimentación positiva domina sobre el negativo. Más adelante, en la medida en la que la población total va disminuyendo, se invierte la dominación de bucles. Entonces es el negativo el que empieza a dominar, limitando el crecimiento por el efecto que representa el agotamiento de la población vulnerable. El caso particular que acabamos de ver, de difusión de una enfermedad, es representativo de una amplia clase de procesos : todos aquellos que muestran un crecimiento sigmoideal. Lo que aquí se ha dicho con respecto a la difusión de una enfermedad, puede decirse con respecto a la introducción de un nuevo producto en un mercado, la difusión de una innovación tecnológica u otros proceso de naturaleza similar. En todos ellos se tiene una estructura con dos bucles de realimentación, y se llega a una formalización análoga a la anterior, que conduce a un crecimiento logístico, como acabamos de ver.

El ejemplo que acabamos de ver constituye una muestra sencilla de las posibilidades que posee el lenguaje que estamos presentando. Se trata de un sistema con una variable de nivel y cuyo comportamiento se muestra en la Figura 18. En sistemas más elaborados, con estructuras más complejas, podemos tener comportamientos con otras pautas. Por ejemplo, si en un mismo bucle de realimentación hay dos o más variables de nivel, entonces pueden presentarse fenómenos oscilatorios (recuérdese la Figura 9b).

Aquí, por el momento, conviene resaltar, como resumen de todo lo anterior, que hemos sido capaces de establecer un nexo entre la estructura de un sistema (su diagrama de influencias) y su comportamiento (las trayectorias que describen las magnitudes asociadas a él) a la que se alude en el título de este Capítulo. A ello es a lo que nos referimos cuando decimos que mediante la dinámica de sistemas estamos tratando de relacionar estructura y comportamiento; de modo que en una descripción como la Tabla 1 están implícitas las dos caras de una misma moneda.

3.3. Dinámica de sistemas

Aunque la denominación dinámica de sistemas, en un sentido amplio, se refiere al comportamiento dinámico que pueden presentar los sistemas, en sentido restringido se emplea para denominar una metodología concreta, desarrollada por Jay W. Forrester, que utiliza el lenguaje que acabamos de presentar para el modelado y la simulación de determinados problemas complejos.

Forrester es un ingeniero que inició su carrera profesional trabajando en servomecanismos y en diseño de computadores. Su éxito en estos campos fue notorio y, entre otras cosas, inventó las memorias de computadores con núcleo de ferrita. De sus trabajos con los servomecanismos aprendió que un sistema dotado de realimentación, en el que se producen retrasos en la transmisión de información, presenta oscilaciones atenuadas en torno a la meta perseguida.

Mediados los años 50 se le planteó el problema que presentaba una gran empresa electrónica que, teniendo un mercado muy estable, sin embargo presentaba importantes oscilaciones en la producción. Forrester intuyó que el problema era análogo al que presentaban los servomecanismos y que en ambos casos las oscilaciones eran producidas por estructuras de realimentación negativa con retrasos en la transmisión de información. Para concretar esta intuición desarrolló la dinámica de sistemas, a la que inicialmente denominó *dinámica industrial*.

Forrester tomó como elemento básico de su análisis la estructura de realimentación negativa (Figura 19). Esta estructura la interpretó con ayuda del lenguaje que hemos presentado en la Sección anterior (en realidad, creó el lenguaje para representar ese problema) de modo que el diagrama de la Figura 19 lo reinterpretó teniendo en cuenta el de la Figura 20, cuyo parecido con el de la Figura 2 es bien patente. De acuerdo con este diagrama, es en los puntos en que se toman las decisiones donde se generan las variaciones que se produ-

cen en el sistema. En estos puntos se recoge la información respecto al estado del sistema, se procesa, y se toman las decisiones. Son análogos a aquellos en los que se determinan las variables de flujo. La estructura básica correspondiente es la de realimentación, ya que las decisiones se toman a partir de la información sobre los resultados de las acciones previamente adoptadas. Como estas acciones son a su vez el resultado de decisiones anteriores se tiene así una cadena circular sin fin como la que se muestra en la Figura 19.

En realidad, en una empresa, en una organización o en cualquier situación real compleja, las estructuras no son tan simples como las de las Figuras 19 y 20, sino que presentan una estructura más complicada del tipo de la que se muestra en la Figura 21, en la que coexisten múltiples bucles de realimentación.

En un sistema complejo las decisiones se toman en múltiples puntos. Estas decisiones provocan acciones que, a su vez, modifican

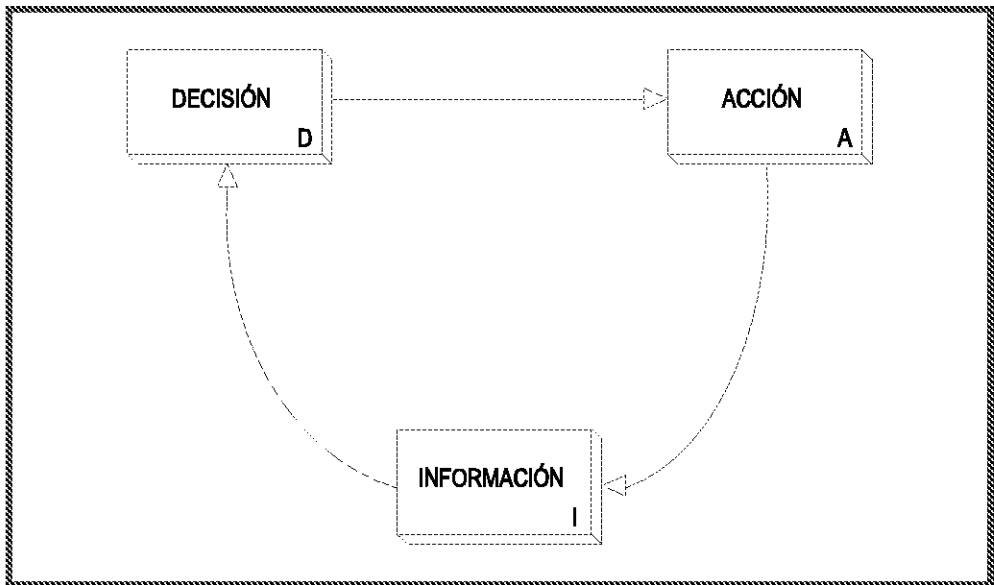


Figura 19. - ESTRUCTURA DE REALIMENTACIÓN NEGATIVA EN EL PROCESO BÁSICO DE TOMA DE DECISIÓN

los valores de las variables del sistema, generando nueva información que sirve de base para ulteriores tomas de decisiones. De este modo se tiene una estructura con múltiples bucles de realimentación, que tomados en su conjunto, describen un sistema complejo. Ello es lo que se ha querido representar en la Figura 21 en la que los recuadros con una **D** indican las decisiones que se toman a partir de la información que se tiene de los resultados de acciones **A** que resultan, a su vez, de esas decisiones.

De lo anterior se desprende que los bucles de realimentación constituyen las estructuras básicas que controlan los cambios que se producen en los sistemas. Aportan la estructura organizativa en torno a la cual se genera la dinámica del sistema. Su importancia no debe ser subestimada. Existe una cierta tendencia a considerar el proceso de toma de decisiones de acuerdo con el esquema simplificado que se muestra en la Figura 22, en la que se representa cómo a partir de la información acerca de un cierto problema se decide la acción a tomar

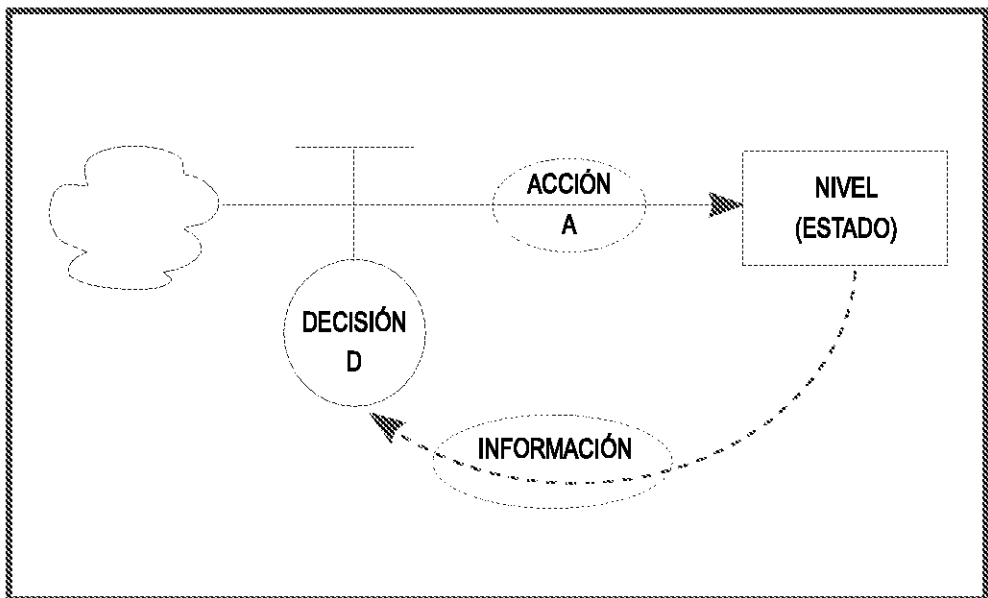


Figura 20. - INTERPRETACIÓN MEDIANTE FLUJOS Y NIVELES DEL PROCESO BÁSICO DE TOMA DE DECISIONES -

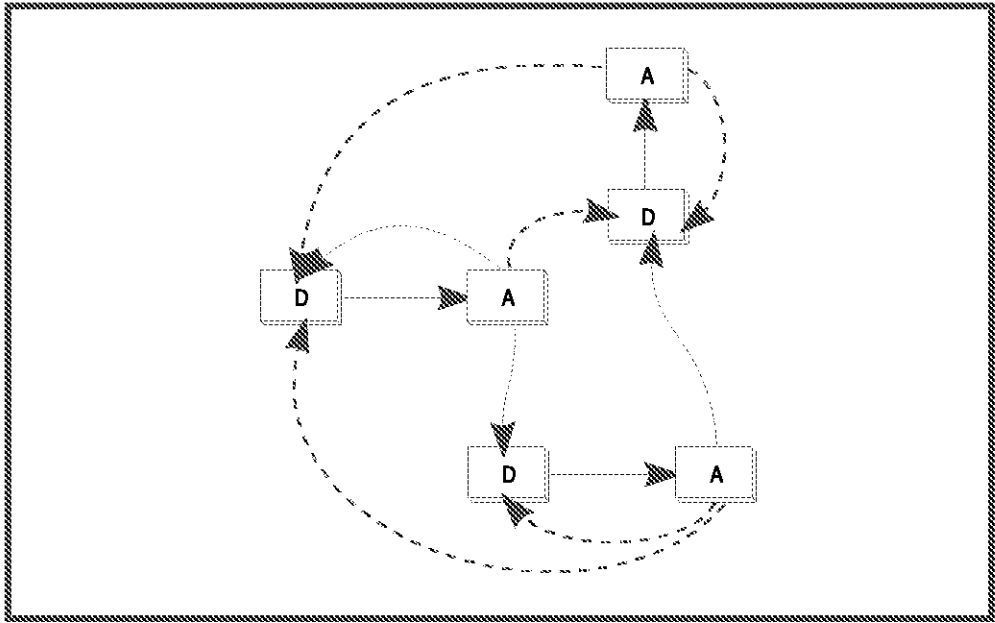


Figura 21. - ESTRUCTURA CON MÚLTIPLES BUCLES DE UN PROCESO COMPLEJO -

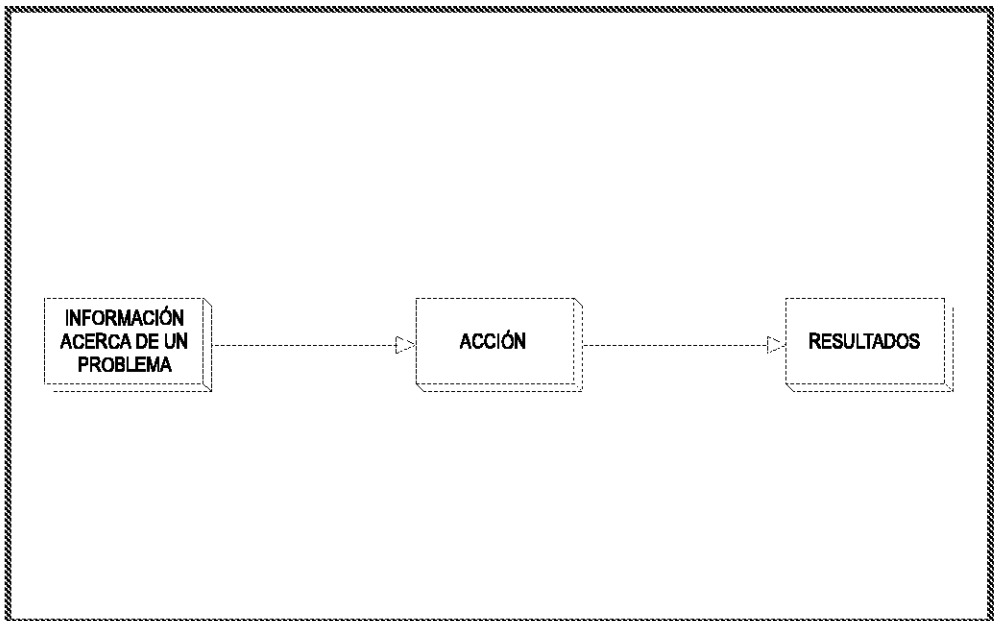


Figura 22. - PERCEPCIÓN LINEAL DEL PROCESO DE TOMA DE DECISIONES -

y se obtienen los correspondientes resultados. Se trata de lo que se conoce también como cadena unidireccional de influencias (en cierta literatura se habla de cadena lineal para aludir a la unidireccional, pero esa denominación es impropia y debe evitarse). En realidad, la representación adecuada de este proceso viene dada por la Figura 23 en la que se muestra una estructura de realimentación que corresponde a una descripción más correcta del proceso. Se tiene una estructura de realimentación, y no una relación unidireccional de influencias. La consideración de la Figura 23, en vez de la 22, tiene importantes consecuencias ya que, como hemos visto, la estructura de realimentación comporta la generación autónoma de comportamiento, por lo que se requieren instrumentos de análisis adecuados. Ello es lo que pretende aportar la dinámica de sistemas.

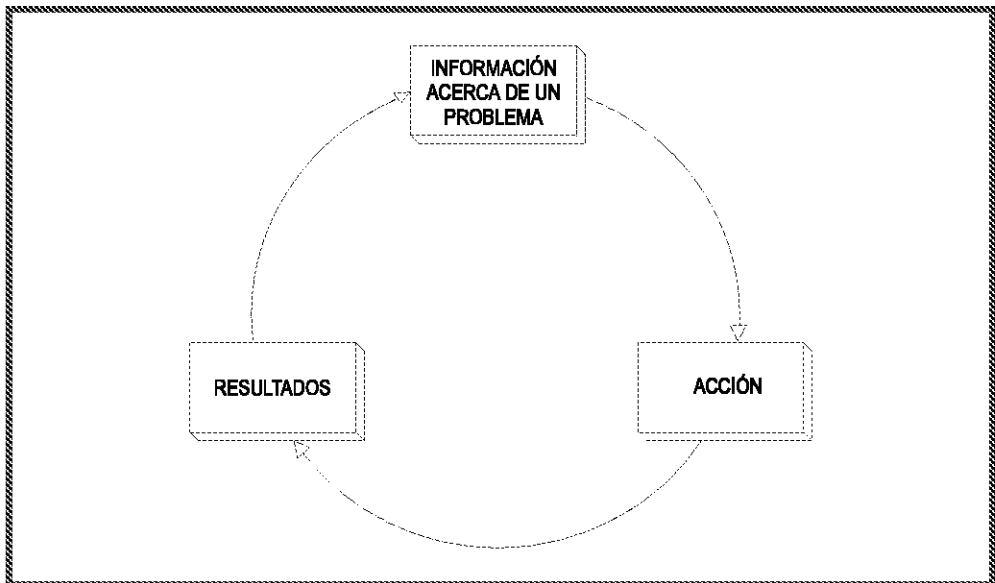


Figura 23. - ESTRUCTURA DE REALIMENTACIÓN DEL PROCESO DE TOMA DE DECISIONES -

4

Construcción, análisis y explotación de modelos



4.1. Modelos de sistemas

Con el material que se ha presentado en el Capítulo anterior se dispone de un lenguaje con el que realizar descripciones de sistemas que permiten, a la vez, dar cuenta de su estructura y de su comportamiento. A una descripción de un sistema mediante un lenguaje de esta naturaleza se la conoce como un *modelo* de ese sistema.

El término modelo está dotado de múltiples acepciones en el lenguaje ordinario. Aquí nos interesa aquella en la que se emplea como sinónimo de representación. Incluso en este caso se usa en doble sentido. Se dice que la persona a la que un pintor pinta (representa) es su modelo; y que una maqueta es el modelo a escala (lo que representa) de un edificio o un vehículo. A nosotros nos interesa este segundo uso, como representación de un cierto aspecto de la realidad. Así, decimos que un plano o un mapa es una representación bidimensional de la estructura geográfica de una cierta área. Nos sirve para conocer las relaciones espaciales entre los accidentes geográficos representados, para poder decidir cómo desplazarse de un punto a otro, y otros usos similares. Del mismo modo que al usuario de un plano lo que le interesan son exclusivamente las relaciones espaciales, al especialista en sistemas lo que le interesa de un sistema es cómo su estructura determina la evolución a lo largo del tiempo de las magnitudes que considera relevantes para describirlo. En este sentido, diremos que el conjunto de expresiones de la Tabla 1 del Capítulo anterior forman un modelo matemático del proceso de difusión de una enfermedad, ya que constituyen

una representación de ese proceso. Estas ecuaciones podemos programarlas en un computador, en cuyo caso tenemos un modelo informático del proceso correspondiente. Con este modelo podemos experimentar con el comportamiento del sistema.

Ante un determinado comportamiento problemático, el sistemista pretende determinar cómo éste emerge de la estructura (Figura 24). Para resolver ese problema debe desarrollar una descripción cuya estructura permita generar ese comportamiento (Figura 25).

4.2. Proceso de modelado

El proceso de modelado consiste en el conjunto de operaciones mediante el cual, tras el oportuno estudio y análisis, se construye el modelo del aspecto de la realidad que nos resulta problemático. Este proceso, consiste, en esencia, en analizar toda la información de la

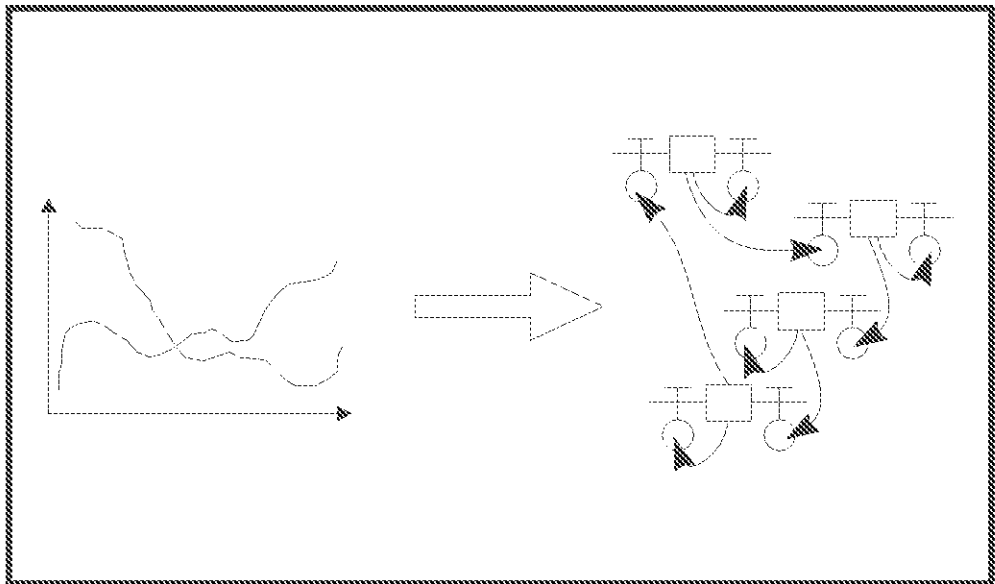


Figura 24. - EN EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO PROBLEMÁTICO DE UN SISTEMA DEBEMOS SER CAPACES DE ASOCIARLE UNA ESTRUCTURA QUE LO GENERE -

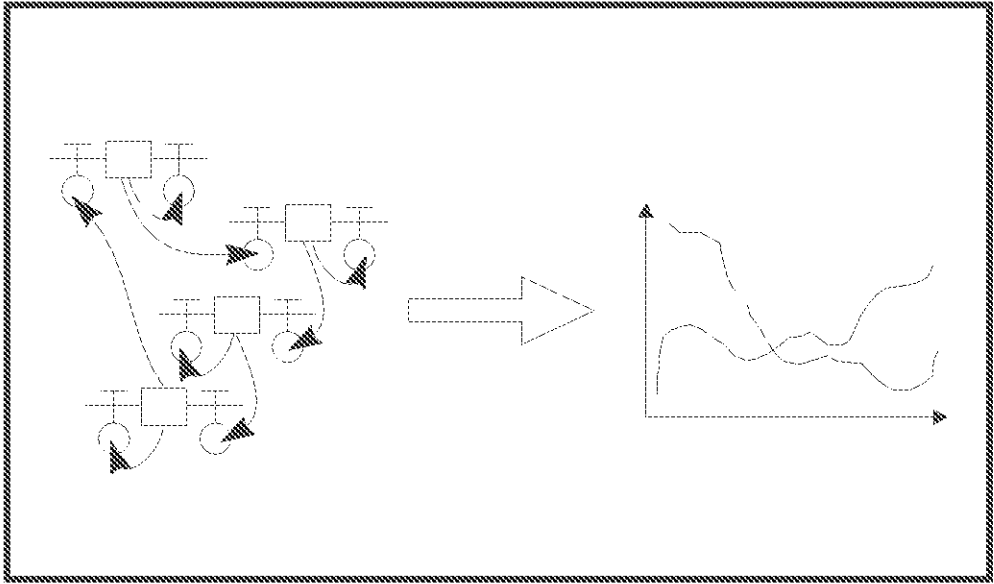


Figura 25. - UNA VEZ CONSTRUIDA LA ESTRUCTURA PODEMOS ESTUDIAR POR SIMULACIÓN LOS COMPORTAMIENTOS QUE GENERA -

que se dispone con relación al proceso, depurarla hasta reducirla a sus aspectos esenciales, y reelaborarla de modo que pueda ser transcrita al lenguaje sistémico que estamos viendo. En el proceso de modelado se pueden distinguir las fases siguientes:

- **Definición del problema.** En esta primera fase se trata de definir claramente el problema y de establecer si es adecuado para ser descrito con los útiles sistémicos que hemos desarrollado. Para ello el problema debe ser susceptible de ser analizado en elementos componentes, los cuales llevan asociadas magnitudes cuya variación a lo largo del tiempo queremos estudiar. Entre estos elementos se producen relaciones de influencia análogas a las R_i que se han visto en la Sección 3.2 al considerar la descripción del proceso de difusión de una enfermedad. Es decir, debe ser razonable adoptar el lenguaje que se ha desarrollado en el Capítulo 2 de esta monografía como adecuado para describir el sistema.

- **Conceptualización del sistema.** Una vez asumida, en la fase anterior, la adecuación del lenguaje sistémico elemental para estudiar el problema, en esta segunda fase se trata de acometer dicho estudio, definiendo los distintos elementos que integran la descripción, así como las influencias que se producen entre ellos. El resultado de esta fase es el establecimiento del diagrama de influencias del sistema.
 - **Formalización.** En esta fase se pretende convertir el diagrama de influencias, alcanzado en la anterior, en el de Forrester. A partir de este diagrama se pueden escribir las ecuaciones del modelo (algunos entornos informáticos permiten hacerlo directamente). Al final de la fase se dispone de un modelo del sistema programado en un computador.
 - **Comportamiento del modelo.** Esta cuarta fase consiste en la simulación informática del modelo para determinar las trayectorias que genera.
 - **Evaluación del modelo.** En esta fase se somete el modelo a una serie de ensayos y análisis para evaluar su validez y calidad. Estos análisis son muy variados y comprenden desde la comprobación de la consistencia lógica de las hipótesis que incorpora hasta el estudio del ajuste entre las trayectorias generadas por el modelo y las registradas en la realidad. Así mismo, se incluyen análisis de sensibilidad que permiten determinar la sensibilidad del modelo, y por tanto, de las conclusiones que se extraigan de él, con relación a los valores numéricos de los parámetros que incorpora o las hipótesis estructurales.
 - **Explotación del modelo.** En esta última fase el modelo se emplea para analizar políticas alternativas que pueden aplicarse al sistema que se está estudiando. Estas políticas alternativas se definen normalmente mediante escenarios que representan las situaciones a las que debe enfrentarse el usuario del modelo.
-

El conjunto de estas fases se representa en la Figura 26. En esta Figura además de la secuencia de los bloques que representan las fases, de arriba a abajo, se muestran flechas que indican vueltas hacia atrás del proceso de modelado. Se quiere con ello indicar que el proceso de modelado no consiste en recorrer secuencialmente, y por orden correlativo, estas fases sino que, con frecuencia, al completar alguna de ellas, debemos volver hacia atrás, a una fase anterior, para reconsiderar algunos supuestos que hasta entonces habíamos considerado válidos. El proceso de modelado es un proceso iterativo mediante el cual se combinan los distintos elementos conceptuales y operativos que suministra la dinámica de sistemas, para alcanzar como resultado final un modelo aceptable del proceso que estamos estudiando. En este sentido, se dice que el proceso de modelado tiene más de arte que de ciencia, y en él el modelista juega un papel esencial.

Para la construcción de un modelo se parte de información de dos tipos. Por una parte, se tienen registros numéricos de las trayec-

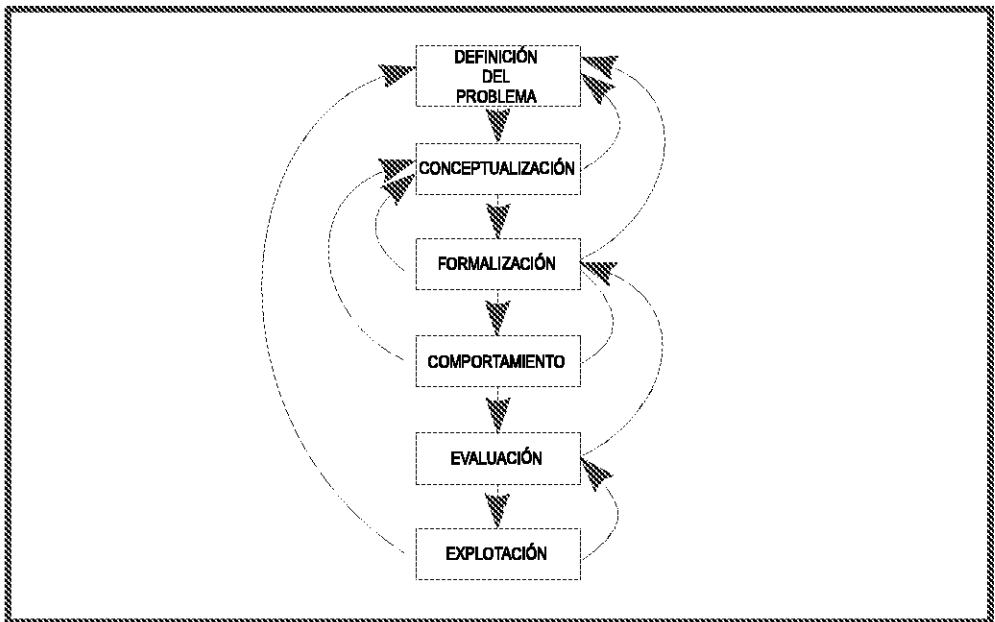


Figura 26. - FASES EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO -

torias seguidas en el pasado por las magnitudes correspondientes. Por otra, se dispone de una información, de naturaleza muy variada, con relación a cómo se producen las interacciones en el seno del sistema. Según la importancia relativa que se dé a estos dos tipos de información, se tienen diferentes métodos de modelado. En los métodos basados en la estadística, se considera que la única información relevante es la del primer tipo y, por tanto, en estos métodos de modelado se trata de realizar un ajuste numérico de los modelos a esos datos.

Por otra parte, en métodos como la dinámica de sistemas se asume que la información relevante es la del segundo tipo. Es decir, información con respecto a cómo se producen las interacciones en el seno del sistema, aunque sea en principio cualitativa. Esta información, mediante el proceso de conceptualización, conduce al diagrama de influencias. Este diagrama se reelabora para construir el de Forrester. Sólo entonces, de acuerdo con este método, como hemos visto al final de la Sección 3.2, empieza a tener interés la consideración de la información numérica.

La Figura 27 pretende poner de manifiesto los distintos grados de información que tenemos con relación a la realidad. De los diferentes problemas con que nos encontramos, la información más amplia de la que se suele disponer es la que suministran los modelos mentales de esas situaciones. Estos modelos sintetizan, de forma más o menos intuitiva, la experiencia que tenemos con respecto a esas situaciones y se encuentran evaluados por los resultados que hemos alcanzado previamente al emplearlos como base de nuestras decisiones. Por otra parte, la información escrita de la que se suele disponer es considerablemente menor. Por último, la información cuantitativa es relativamente escasa. Sin embargo, debemos tomar decisiones, especialmente con relación a problemas complejos, teniendo en cuenta esos tres tipos de información. Por tanto, conviene que seamos capaces de integrarla. Eso es lo que permite la dinámica de sistemas.

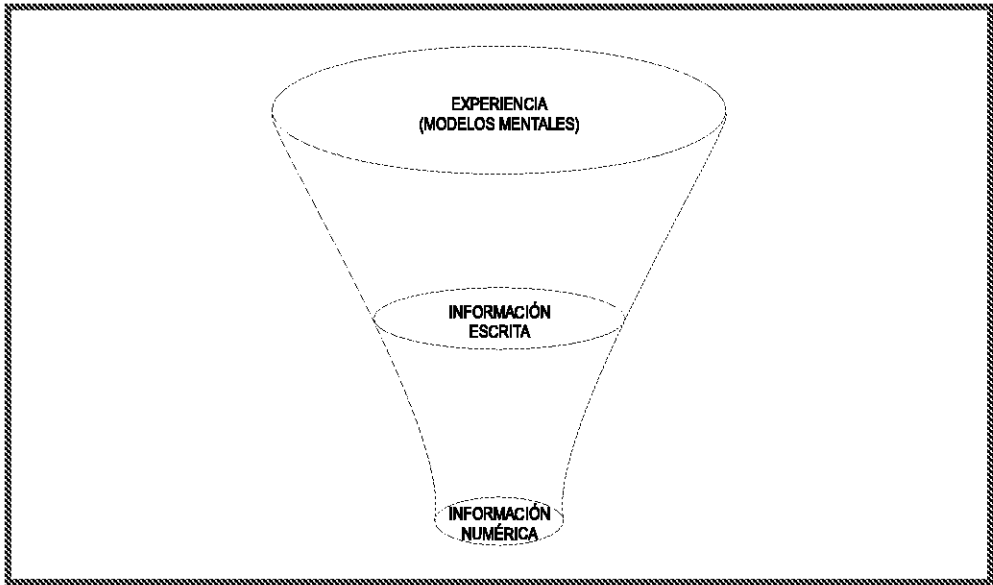


Figura 27. - DIFERENTES FUENTES DE INFORMACIÓN DE LAS QUE SE NUTRE LA CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO -

En la labor de integración que se produce en un modelo tiene lugar una generación de comportamiento que no se debe subvalorar. El modelo aporta estructuras que generan comportamientos. Por tanto, en el modelo, además de la información de distinto tipo que estamos comentando, se incorporan estructuras que justifican, a veces en gran medida, el comportamiento. En el modelo, al integrarse la información mediante las estructuras adecuadas, se tienen modos de comportamiento no triviales. En este sentido, decimos que un modelo contribuye a la generación de conocimiento.

4.3. Simulación de un modelo

Como hemos visto en la Tabla 1 del Capítulo anterior, un modelo matemático consiste esencialmente en un conjunto de ecuaciones. Para procesarlas necesitamos de la ayuda de la informática. Una vez programadas en un computador podemos experimentar con el mode-

lo. Este proceso recibe la denominación de simulación informática del sistema y requiere de herramientas informáticas adecuadas. Por lo que respecta a la dinámica de sistemas se han desarrollado un cierto número de ellas. Las más empleadas son:

- **Professional DYNAMO.** Es el más clásico de los lenguajes. No presenta posibilidades de modelado mediante iconos, pero sin embargo permite tratar ecuaciones de gran dimensión. La mayor parte de los modelos que se encuentran en los libros clásicos de la dinámica de sistemas están escritos en este lenguaje.
 - **STELLA y i-think.** Son entornos informáticos de amplia capacidad interactiva que permiten construir modelos empleando procedimientos gráficos, mediante iconos. Ambos poseen una estructura similar, pero mientras el primero se encuentra más orientado hacia usos académicos el segundo lo hace hacia aplicaciones profesionales. Ambos permiten construir los diagramas de Forrester en la pantalla del computador, de modo que al establecer su estructura se generan las ecuaciones. Se pueden agrupar elementos en sus modelos, y posee un *zoom* que permite desenvolverse con modelos complejos.
 - **PowerSim.** Entorno de características análogas a los anteriores (mientras aquellos son americanos, este es europeo —en concreto noruego). Permite desarrollar varios modelos simultáneamente, e interconectarlos posteriormente entre sí.
 - **VenSim.** Con respecto a las anteriores presenta algunas ventajas con relación a la organización de datos y a posibilidades de optimización. Se trata de un lenguaje muy potente para el desarrollo de modelos que pueden emplearse tanto en entornos PC como en *Unix*. Permite documentar automáticamente el modelo según se va construyendo, y crea árboles que permiten seguir las relaciones de causa efecto a lo largo del modelo. Está dotado de instrumentos para realizar análisis estadísticos.
-

- **Mosaikk-SimTek.** Mosaikk es una herramienta muy sofisticada para PC, que conecta directamente al **SimTek**, que es un lenguaje de modelado tipo DYNAMO que posee una gran versatilidad.

En la Figura 28 se muestra una pantalla del tipo de las que suministran estos entornos informáticos.

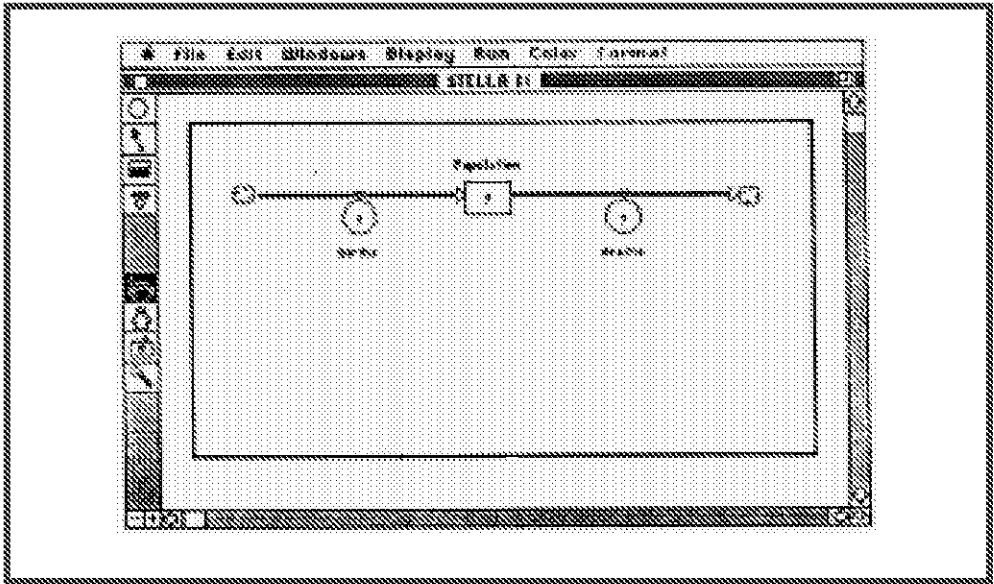


Figura 28. - PANTALLA CON VENTANAS DE UN ENTORNO PARA DINÁMICA DE SISTEMAS -

4.4. Análisis de sensibilidad de un modelo

Los problemas a los que se aplica habitualmente la dinámica de sistemas incluyen relaciones y parámetros de los que se dispone de pocos datos empíricos. En un modelo de dinámica de sistemas se produce una integración de información de tipo cualitativo con información de tipo cuantitativo. Esta mezcla tan dispar puede producir problemas. En todo modelo hay una componente de imprecisión que no podemos

eludir. El hecho de que asignemos un valor numérico concreto a un parámetro, o una forma funcional determinada a la expresión que relaciona dos variables, nos obliga a preguntarnos que sucedería si el valor de ese parámetro o de esa función, fuesen otros, aunque esos valores sean próximos a aquel que hemos adoptado. El análisis de sensibilidad pretende precisamente abordar este problema.

Otra razón para realizar el análisis de sensibilidad es que los modelos, debido a su complejidad, pueden resultar difíciles de comprender. Este análisis aporta un instrumento para alcanzar una mejor comprensión sobre cuales son los puntos de actuación en los que se pueden producir efectos más considerables.

El análisis de sensibilidad consiste en un estudio sistemático de cómo afectan a las conclusiones de un modelo las posibles variaciones en los valores de los parámetros y en las relaciones funcionales que incluye. La forma más simple de realizar el análisis consiste en modificar los valores numéricos de cada uno de sus parámetros. Para ello se incrementa el valor del parámetro cuya sensibilidad se quiere estudiar en un cierto porcentaje y se analiza en qué medida esta variación afecta a las conclusiones del modelo (a las trayectorias que genera). Realizándolo de forma sistemática para todos los parámetros, con incrementos y decrementos previamente establecidos, se puede tener una evaluación de los efectos de esas modificaciones sobre las conclusiones del modelo. Diremos que el modelo es insensible a las variaciones de los parámetros, si variaciones razonables de ellos no afectan sensiblemente a las conclusiones que se extraen del mismo.

El problema que presenta la realización del análisis como se acaba de describir, es que al modificar cada uno de los parámetros separadamente se prescinde de los posibles efectos de variaciones conjuntas de varios de ellos. Si se quiere evitar este reparo, entonces debe procederse a formas de análisis de sensibilidad más elaboradas como son las que permite la aplicación del método de Montecarlo. De

acuerdo con este método se sortean aleatoriamente los valores de los parámetros, de acuerdo con una distribución que represente su dispersión con relación a los valores considerados normales, y se simula el modelo con los valores de los parámetros que resulten de ese sorteo. Los resultados de cada simulación se almacenan. Se repite el proceso un cierto número de veces hasta conseguir almacenar un número importante de trayectorias que se someten a un análisis estadístico para estudiar su eventual dispersión. Esta dispersión es una medida de la sensibilidad del modelo.

En el análisis de sensibilidad no sólo se considera los valores de los parámetros, sino las propias relaciones funcionales. El estudio sistemático de las modificaciones de esas relaciones es más complejo que el de los valores numéricos de los parámetros. No existe un método general para abordar este problema, pero en cada caso concreto es posible encontrar una solución, ya que, en último extremo, toda relación funcional incorpora un cierto número de parámetros.

El análisis de sensibilidad de un modelo constituye uno de los elementos esenciales para evaluación. Nos permite dar respuesta a dos tipos de cuestiones: por una parte, en qué medida el modelo es insensible a variaciones en su estructura y, por tanto, resulta robusto; y, por otra, cuales son los puntos de máxima sensibilidad del modelo que sugieren cuales son las actuaciones sobre el proceso real que serán más efectivas.

Existen otras formas de abordar el problema del análisis de sensibilidad. Una forma especialmente interesante está basada en la aplicación de los resultados de la teoría cualitativa de los sistemas dinámicos a un modelo de dinámica de sistemas que, como hemos visto en la expresión (3.7), en realidad es un sistema dinámico. De este modo conceptos como el de estabilidad estructural pueden aplicarse a un modelo de dinámica de sistemas. Sin embargo estas técnicas comportan un nivel matemático muy elaborado que excede el nivel de esta monografía (véase [18]).

4.5. Explotación de un modelo

Todo modelo se construye con el fin de ayudar a resolver un problema concreto. En consecuencia, la explotación del modelo consistirá precisamente en valerse de él para resolver ese problema. Sin embargo, esa explotación puede tomar formas variadas. En algunos casos, el modelo permite hacer predicciones. Es decir, alcanza un nivel de precisión tan elevado que nos permite emplearlo para predecir con exactitud qué valores tomarán algunas magnitudes en un instante de tiempo determinado del futuro. Estos modelos predictivos presuponen que el modelo tenga una gran precisión, tanto por lo que respecta a los valores de los parámetros, como a las relaciones funcionales que incluye. Este grado de precisión se alcanza normalmente en las ciencias físicas, por lo que es en este ámbito donde se dan con mayor frecuencia este tipo de modelos. Ello no excluye que en determinados problemas de las ciencias sociales puedan hacerse también predicciones, pero estas no suelen tener el grado de aceptación de las que se logran en las ciencias físicas.

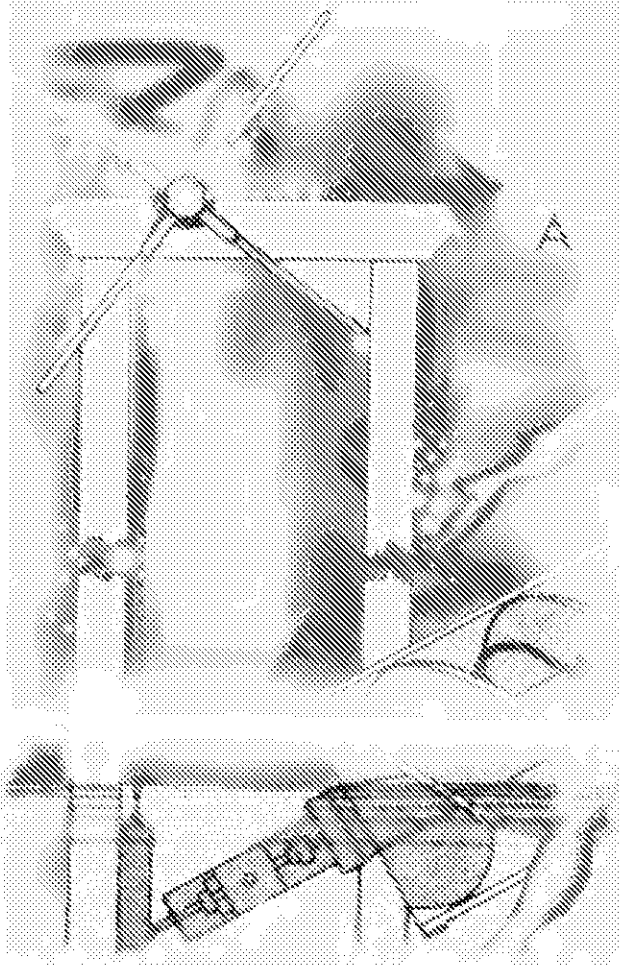
Otra de las posibles utilizaciones de los modelos, especialmente cuando incorporan una cierta imprecisión, consiste en emplearlos no tanto para hacer predicciones concretas de valores numéricos precisos para determinadas magnitudes, sino para analizar las tendencias de evolución de esas magnitudes. Así, se trata de establecer si una magnitud tiende a crecer, a decrecer, a oscilar, o a permanecer invariable. Se tratan de predicciones más laxas que las consideradas en el párrafo anterior. En realidad, en este caso estamos más próximos a hacer previsiones que propiamente predicciones.

Por último, el tercer uso posible de los modelos consiste en emplearlos como instrumentos para analizar los distintos modos de comportamiento que puede mostrar ese sistema. De acuerdo con este uso, los modelos no tratan de ayudarnos a anticipar el porvenir, sea en forma precisa o en forma más laxa, sino de suministrarnos elementos para una reflexión disciplinada sobre los posibles modos de des-

envolverse el sistema que estamos estudiando. Este uso se encuentra en la actualidad muy generalizado y consiste en emplearlos como bancos de prueba para el aprendizaje.

En este sentido se ha propuesto aplicar el concepto de micromundo (*microworld*) de Seymour Papert. De acuerdo con este autor el proceso de aprendizaje se refuerza cuando se dispone de objetos adecuados con los que se mantiene una interacción que, en alguna medida, recuerda a un juego. Estos objetos pueden desarrollarse informáticamente, y en particular, Papert empleó el LOGO para la enseñanza de la geometría a niños. Se ha propuesto emplear estas mismas ideas en el ámbito de la dinámica de sistemas para que los directivos de las empresas puedan organizar sus estrategias empresariales, con ayuda de modelos de simulación, que les sirvan para ensayar esas estrategias y reelaborarlas como consecuencia de la interacción que se tiene con el modelo de simulación que las incorpora. De este modo se crea un entorno de aprendizaje en el que el directivo puede ensayar las potenciales políticas que trate de aplicar para resolver los problemas de su empresa. El desarrollo de micromundos goza en la actualidad de un gran desarrollo, y se considera una de las líneas de aplicación de la dinámica de sistemas más prometedoras [19] [20].

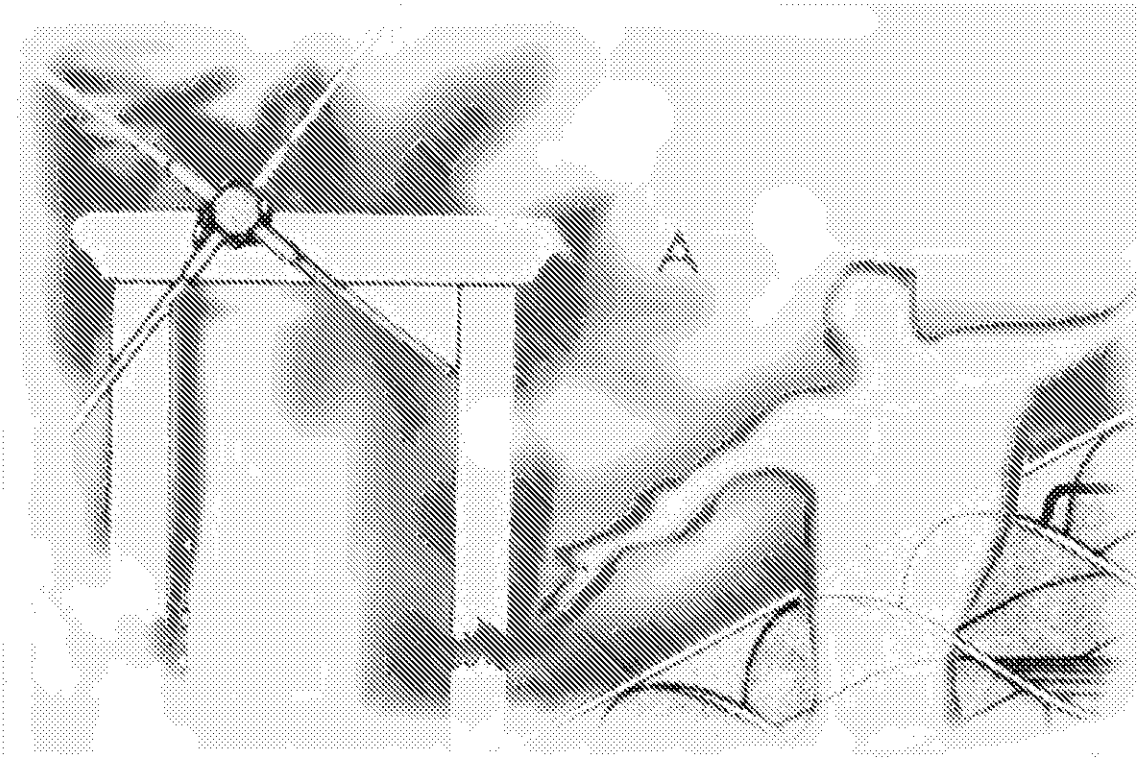
Referencias



- [1] Forrester, J.W., Industrial Dynamics, Productivity Press, 1986.
- [2] Roberts, E.B., Managerial Applications of System Dynamics, The MIT Press, 1978.
- [3] Alfeld, L. y A. Graham, Introduction to Urban Dynamics, Wright-Allen Press, 1976.
- [4] Forrester, J.W., Urban Dynamics, Productivity Press, 1986.
- [5] Hamilton, H.R., System Simulation for Regional Analysis, The MIT Press, 1969.
- [6] Forrester, J.W., World Dynamics, Productivity Press, 1974.
- [7] Meadows, D. y otros, Dynamics of Growth in a Finite World, Wright-Allen Press, 1974.
- [8] Meadows, D. y otros, Más allá de los límites del crecimiento, El País-Aguilar, 1992.
- [9] Hanneman, R.A., Computer-assisted Theory Building, Sage, 1988.
- [10] Jacobsen, C. y R. Bronson, Simulating Violators, ORSA, 1985.
- [11] Gutiérrez, L. y W. Fey, Ecosystem Succession, The MIT Press, 1980.
- [12] Meadows, D.L. y D.L. Meadows, Toward Global Equilibrium, Wright-Allen Press, 1973.
- [13] Choucri, N., International Energy Futures, The MIT Press, 1981.
-

-
- [14] Naill, R.F., Managing the Energy Transition, Ballinger, 1977.
- [15] Wolstenholme, E., Systems Enquiry, Wiley, 1990.
- [16] Senge, P., La quinta disciplina, Ediciones Granica, 1992.
- [17] Aracil, J., Introducción a la dinámica de sistemas, Alianza Editorial, 1986.
- [18] Aracil, J. y M. Toro, Métodos cualitativos en dinámica de sistemas, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 1993.
- [19] Pérez Ríos, J., Dirección estratégica y pensamiento sistémico, Universidad de Valladolid, 1992.
- [20] Morecroft, J. y J. Sterman, Modeling for Learning Organizations, Productivity Press, 1994.
-

Bibliografía



- Aracil, J.:** *Máquinas, sistemas y modelos*,
Tecnos, 1986.
- Forrester, J. W.:** - *Dinámica industrial*,
Editorial El Ateneo, Buenos Aires.

- *Collected papers*,
Wright-Allen Press, Inc. 1975.
- Goodman, M.:** *Study Notes in System Dynamics*,
Productivity Press.
- Martínez-Vicente, S.
y A. Requena:** - *Simulación dinámica por ordenador*,
Alianza Editorial, 1988.

- *Dinámica de sistemas*,
(dos volúmenes), Alianza Editorial 1986.
- Papert, S.:** *Mindstorms*,
The Harvester Press, 1980.
- Randers, J.:** *Elements of the System Dynamics Method*,
M.I.T. Press, 1980.
- Rosnay, J.:** *El macroscopio*,
Editorial AC, 1977.
-

Glosario



1. Bucle cerrado *ver* **Realimentación.**

2. Comportamiento de un sistema. Representación gráfica del conjunto de trayectorias que describen los cambios que sufren a lo largo del tiempo las variables asociadas a un sistema.

3. Constante. Elemento cuyo valor no cambia durante una simulación.

4. Crecimiento sigmoidal. Crecimiento caracterizado por una fase inicial de crecimiento exponencial seguida por una fase de estabilización en un valor constante. Recibe también la denominación de crecimiento logístico.

5. Diagrama causal *ver* **Diagrama de influencias.**

6. Diagrama de flujos-niveles *ver* **Diagrama de Forrester.**

7. Diagrama de Forrester. Diagrama que muestra las relaciones entre las variables de un sistema, una vez que han sido clasificadas en variables de nivel, de flujo y auxiliares. Constituye una reelaboración del *diagrama de influencias*. Recibe también las denominaciones de diagrama de flujos y niveles, de flujos-niveles, o diagrama dynamo, esta última denominación por su relación con el lenguaje informático DYNAMO.

8. Diagramas de influencias. Grafo cuyos nodos son los ele-

mentos del sistema y cuyas aristas indican las influencias entre ellos. Constituye una representación gráfica de la **estructura** del sistema. Recibe también la denominación de **diagrama causal**.

9. Dinámica de sistemas. Disciplina para el estudio de las relaciones entre la **estructura** y el **comportamiento** de un sistema con ayuda de modelos informáticos de simulación.

10. Equilibrio. Estado de un sistema en el cual ninguna de sus variables cambia a lo largo del tiempo.

11. Estado. Información concerniente a un sistema a partir de la cual se puede predecir su futura evolución. En los modelos de dinámica de sistemas el estado viene representado por el conjunto de variables de **nivel**.

12. Estructura. Forma en que los elementos de un sistema se encuentran organizados o interrelacionados. La estructura se representa mediante el **diagrama de influencias** o causal.

13. Flujo. Variable que representa el cambio que sufre una determinada magnitud por unidad de tiempo. En los modelos de dinámica de sistemas se asocian a cada variable de nivel una o varias variables de **flujo**.

14. Límites de un sistema. Límites que delimitan el sistema que se está considerando. En el interior del sistema se incluyen exclusivamente los elementos considerados más relevantes para el problema estudiado. Los elementos que afectan y a su vez son afectados por el sistema se consideran en el interior de los límites, mientras que aquellos que sólo afectan o se ven afectados se consideran fuera de los límites.

15. Modelo. Objeto artificial construido para representar de forma simplificada a un sistema real o a un fenómeno de la realidad.

Analizando el comportamiento del modelo se extraen consecuencias con relación al del sistema modelado.

16. Modelo informático. Modelo de simulación susceptible de ser implantado en un computador.

17. Modelo mental. Representación informal de un cierto aspecto de la realidad, pero que recoge la experiencia que poseen los especialistas en el problema correspondiente. En dinámica de sistemas suele emplearse como punto de partida del proceso de modelado.

18. Nivel. Variable que corresponde a un proceso de acumulación en la dinámica de un sistema. Este proceso se realiza mediante las variables de **flujo**.

19. Nube. Símbolo empleado en los diagramas de Forrester para indicar una fuente o un sumidero de una variable de **nivel**. La fuente no resulta relevante para el modelo.

20. Pauta de comportamiento. Tendencias globales del comportamiento de un sistema. Ejemplos de pautas son: crecimiento y declive, oscilación, y estabilidad en un equilibrio.

21. Proceso de modelado. Proceso mediante el cual se construye un modelo de un aspecto problemático de la realidad. En dinámica de sistemas comprende tres pasos fundamentales: la elaboración de un **modelo mental**, su transcripción a un **diagrama de influencias** y su conversión en un **diagrama de Forrester**, a partir del cual se dispone ya de un modelo matemático que puede ser programado en un computador.

22. Realimentación. Proceso en virtud del cual se recibe continuamente información con relación a los resultados de las acciones previamente tomadas, de modo que a partir de esa información, y de los objetivos propuestos, se adoptan las decisiones con relación a las

futuras acciones a tomar. La estructura de influencias correspondiente es circular. Se emplea también, aunque incorrectamente, el término «retroalimentación».

23. Realimentación negativa. Bucle de realimentación formado por una cadena circular cerrada de influencias, un número impar de las cuales es negativa. Un sistema dotado de realimentación negativa tiende a mantener invariantes los valores de sus variables, y a restituirlos cuando han sido modificados por efecto de una perturbación exterior.

24. Realimentación positiva. Bucle de realimentación formado por una cadena circular de influencias todas ellas positivas, o si las hay negativas su número es par, de modo que se compensen entre ellas. Su comportamiento está caracterizado por el crecimiento sin límites de toda perturbación.

25. Sensibilidad. Análisis que pretende medir la influencia en las conclusiones que se extraen de un modelo de las variaciones en los valores que se asignan a los parámetros.

26. Simulación. Proceso mediante el cual se implanta en un computador un modelo matemático de un cierto aspecto de la realidad.

27. Sistema. Entidad formada por un conjunto de elementos en interacción.

28. Sistema dinámico. Objeto matemático formado por un espacio de estados y una regla que prescribe la evolución en él. Los modelos matemáticos que se construyen mediante dinámica de sistemas son sistemas dinámicos.

29. Trayectoria. Representación gráfica del comportamiento de una variable. Normalmente en abscisas se representa el tiempo, y en

ordenadas la variable correspondiente.

30. Variable. Atributo de un sistema al que se puede asociar una medida mediante un número real y cuyo valor puede cambiar a lo largo del tiempo.

31. Variable auxiliar. En dinámica de sistemas, variable que representa un paso intermedio en el cálculo de una variable de flujo.

32. Variable exógena. En dinámica de sistemas, variable que afecta al sistema pero que no es afectada por ninguna otra del sistema.

*Esta primera edición de
DINÁMICA DE SISTEMAS
de la serie de
Monografías de Ingeniería de Sistemas
se terminó de imprimir el día
1 de marzo de 1995.*
