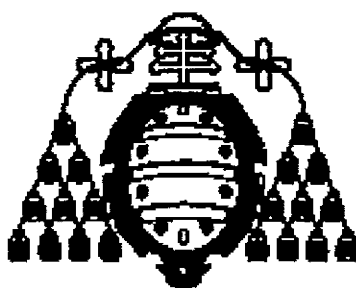


LA DINÁMICA DE SISTEMAS COMO METODOLOGÍA  
PARA LA ELABORACIÓN DE MODELOS DE  
SIMULACIÓN.

Doc. 168/99

Begoña González-Busto Múgica

# **UNIVERSIDAD DE OVIEDO**



## **LA DINÁMICA DE SISTEMAS COMO METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN**

**Begoña González-Busto Múgica**

**DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS Y  
CONTABILIDAD**

Oviedo, Diciembre de 1998

## Introducción

La dinámica de sistemas surgió de un estudio realizado para una compañía americana a mediados de la década de los 50<sup>1</sup>. Dicha empresa, preocupada por los comportamientos antiintuitivos<sup>2</sup> observados en la evolución de sus pedidos, y sus consiguientes efectos negativos sobre la marcha de la organización, decidió encargar un estudio al MIT (Massachusetts Institute of Technology), dirigido por Jay W. Forrester.

En principio el MIT optó por emplear técnicas de investigación operativa. Sin embargo, se llegó pronto a la conclusión de que el enfoque que habían adoptado como punto de partida no era el adecuado y no conducía a resultados satisfactorios. Se centró entonces la atención en la existencia de estructuras de realimentación de la información dentro del sistema. En concreto, se detectó cómo la combinación de retrasos en la transmisión de información y de las estructuras de realimentación era el origen y causa de las oscilaciones observadas en los niveles de pedidos.

Esta idea de que un bucle de realimentación con demoras en su cadena puede originar oscilaciones fue tomada como punto de partida para tratar de resolver el problema planteado. Así, a partir de ese momento se centró el interés en los elementos que intervenían en el proceso y en las interrelaciones existentes entre los mismos, con la finalidad de detectar los bucles de realimentación negativos cuya existencia justificaba los comportamientos oscilantes que se habían detectado. La adopción de este nuevo enfoque permitió una mejor comprensión del sistema objeto de análisis y del problema de partida al permitir la obtención de una visión global del mismo, facilitando el planteamiento de medidas alternativas que eliminaran las fluctuaciones y permitieran la consecución del equilibrio.

Como consecuencia del éxito alcanzado en la resolución de este problema, Forrester sistematizó esta nueva metodología, dándole la denominación de *dinámica industrial*. La dinámica industrial trata del sistema central subyacente en la actividad industrial y tiene como objetivo el "diseño de empresa", cuya meta es crear mejores políticas de dirección y mejores estructuras organizativas. De este modo, a partir de fines de la década de los 50, la dinámica industrial comenzó a ser aplicada sistemáticamente a la resolución de casos prácticos, pudiendo ser considerada hoy en día como una metodología convencional.

La dinámica industrial es una forma de orientar el estudio de los sistemas industriales, que persigue mostrar cómo las políticas, decisiones, la estructura y las demoras se interrelacionan para influir en el desarrollo y estabilidad de los mismos (Forrester, 1961). La dinámica industrial agrupa cada una de las áreas funcionales: dirección, inversión, investigación, comercialización, personal, producción y contabilidad, reduciéndolas a una base común, de modo que cualquier actividad económica o empresarial se reduce a un flujo, ya sea monetario, de pedidos, de materiales, de personal o de equipamiento. Estos cinco flujos se conectan a través de una red de información; dicha red es considerada fundamental por la dinámica industrial puesto que es la que otorga al sistema sus propias características dinámicas.

Si bien en un principio, y como su nombre indica, la dinámica industrial fue únicamente aplicada al ámbito industrial, a mediados de los años 60 esta metodología comenzó a ser empleada para sistemas enmarcados en otros ámbitos<sup>3</sup>. Estas nuevas

---

<sup>1</sup> Esta compañía, la Sprague Electric, se dedicaba a la fabricación de componentes electrónicos de alta precisión que ofertaba en un mercado constituido por un número reducido de clientes fuertes. Ante esta situación, la compañía estimaba que los pedidos debían mantenerse constantes a lo largo del tiempo; sin embargo, observó como éstos sufrían fuertes oscilaciones.

<sup>2</sup> Con ello se hace mención a la contradicción existente entre una demanda más bien constante y unos pedidos que fluctúan a lo largo del tiempo, tal y como se describe en la nota al pie anterior.

<sup>3</sup> Como por ejemplo al estudio de ciudades a través de *Urban Dynamics* (Forrester, 1969). Por otro lado, en 1970 el Club de Roma encargó a Forrester la realización de un modelo del mundo analizándolo como un sistema dinámico. Dicho trabajo fue publicado en 1971 por este autor bajo el título de *World Dynamics*.

aplicaciones concretas de la dinámica industrial a otros ámbitos distintos al de partida, y la certidumbre de que podía ser empleado en una amplia gama de sistemas sociales, pusieron de manifiesto que la denominación empleada era inadecuada. De ahí que la antes denominada dinámica industrial pasara a denominarse dinámica de sistemas, denominación que ha tenido una amplia difusión y que actualmente es empleada por múltiples instituciones y en muy diversos tipos de sistemas.

## 1. Fundamentos de la dinámica de sistemas

La dinámica industrial fue factible gracias a cuatro fundamentos desarrollados durante los veinte años anteriores a su aparición (Forrester, 1961). En primer lugar, la teoría sobre los sistemas de realimentación de información sirvió de apoyo para comprender la búsqueda de objetivos, el "interjuego autocorrectivo" entre las partes de un sistema. En segundo lugar, la investigación efectuada en relación con la naturaleza de la adopción de decisiones en el ámbito de las tácticas militares modernas constituyó una base para comprender el lugar que ocupa la toma de decisiones en el ámbito industrial. En tercer lugar, el diseño de modelos experimentales de sistemas altamente complejos, tanto de ingeniería como militares, demostró que también podían ser puestos en práctica para sistemas sociales. Finalmente, la aparición de los computadores digitales supuso un gran avance en la medida en que se convirtió en el instrumento idóneo para la resolución de gran cantidad de cálculos o cálculos requeridos en los modelos<sup>4</sup>.

En cuanto a la teoría del control de la realimentación, el principal fundamento de la dinámica industrial es el concepto de *servomecanismo* o *sistema de realimentación de la información*<sup>5</sup>. La idea que subyace a este concepto es que las interacciones entre los componentes de un sistema pueden ser más relevantes que los componentes en sí mismos. Como definición a este concepto:

*El sistema de realimentación de información existe cuando el medio conduce a un acto decisivo cuyo resultado es una acción que influye en el medio y, por lo tanto, en las decisiones futuras.*

Debe señalarse que esta definición hace referencia, no sólo a decisiones conscientes o explícitas, sino también a decisiones inconscientes o implícitas. La utilidad que se desprende del estudio de estos sistemas de realimentación es la posibilidad de comprender de qué modo el volumen de las acciones correctivas y de las demoras en el tiempo entre acción y efecto en los componentes interconectados de un sistema pueden originar comportamiento fluctuante o inestable.

El segundo fundamento de la dinámica industrial antes mencionado es el proceso de toma de decisiones. En la década de los 50 se consiguió un mejor entendimiento de la toma de decisión íntimamente ligado a la automatización de las operaciones de táctica militar<sup>6</sup>. La experiencia resultante en el ámbito militar de este nuevo enfoque, en relación con la determinación de las bases de decisión, se puso a disposición del estudio de los sistemas gerenciales.

El tercer fundamento consiste en el acercamiento experimental al análisis del sistema. El análisis matemático no es en ocasiones lo suficientemente potente como para ofrecer soluciones analíticas de carácter general para situaciones de elevada complejidad, como las

---

<sup>4</sup>Estos fundamentos aparecen mencionados en el prefacio de *Dinámica Industrial* (Forrester, 1961) y desarrollados con más profundidad en las pp. 14-19 de dicha obra.

<sup>5</sup> Su evolución se produjo durante y tras la segunda Guerra Mundial.

<sup>6</sup> Durante el transcurso de la segunda Guerra Mundial, y debido a la rapidez con que se sucedían los acontecimientos, se comenzó a centrar más la atención en el planteamiento estratégico que en las decisiones tácticas. Con ello se pretendía anticipar cualquier tipo de eventualidad, estableciendo de antemano la política a seguir y el modo en que habían de tomarse las decisiones tácticas. Este tipo de predicciones se efectuaba automáticamente a través de máquinas y fueron investigadas, aceptadas y, finalmente, llevadas a la práctica.

que se producen en el mercado<sup>7</sup>. El enfoque alternativo consiste en el empleo de un enfoque experimental mediante la elaboración de un modelo matemático de un sistema industrial que describa de forma detallada el sistema. A partir del mismo, se observa el comportamiento del modelo y se efectúan experimentos con el fin de dar respuesta a preguntas específicas acerca del sistema representado. Este proceso de experimentación recibe el nombre de simulación<sup>8</sup>.

Finalmente, se señala como cuarto fundamento de la dinámica industrial la aparición de los computadores digitales. El hecho de que el coste de su utilización para el cálculo de cálculos aritméticos se redujera notablemente y de que se incrementase su velocidad de cálculo favoreció su expansión. De hecho, su uso se generalizó a partir de la segunda mitad de la década de los 50 y hoy en día es el instrumento fundamental para la elaboración de cualquier modelo sistémico.

Se distinguen tres líneas de desarrollo científico-técnico que se combinan en la dinámica de sistemas (Aracil, 1986): las técnicas tradicionales de gestión de sistemas sociales, tanto privados como públicos, la teoría de los sistemas realimentados y, finalmente, la simulación por computadora.

A partir de estas tres líneas, la siguiente figura recoge la interrelación entre las mismas, mostrando un esquema de la génesis de la dinámica de sistemas:

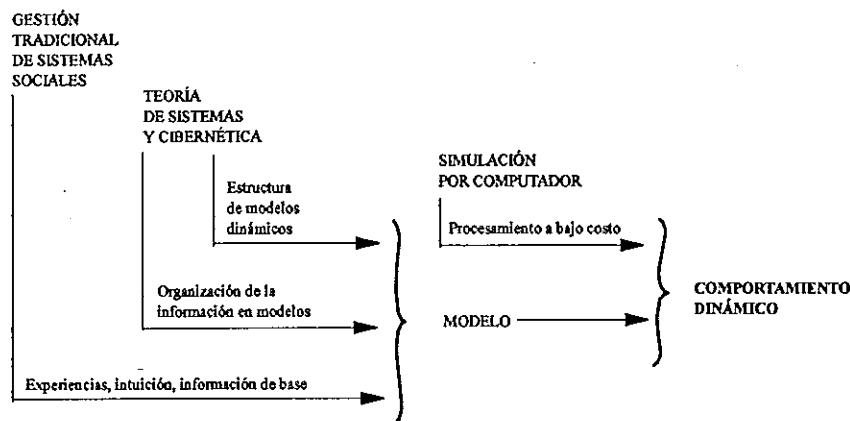


Figura 1.1: Esquema de la génesis de la dinámica de sistemas

Fuente: Aracil, 1986<sup>9</sup>

En primer lugar, la gestión de todo sistema social implica la toma de decisiones que se pretende sean óptimas en términos de racionalidad y consistencia. Los procesos de toma de decisiones, tanto en la gestión pública como en la privada, se basan normalmente en factores tales como la intuición, la experiencia pasada en situaciones parecidas o similares y en el empleo de información de base. Todos estos factores integran los denominados modelos mentales que subyacen a la toma de decisiones en cualquier ámbito.

<sup>7</sup>Debe recordarse que Forrester en un primer momento únicamente tiene en cuenta el ámbito industrial, de ahí que haga mención al comercio; sin embargo debe recordarse que dicha afirmación puede hacerse extensible a cualquier ámbito en que se detecten sistemas susceptibles de ser analizados mediante el empleo de esta óptica, p. 18 de *Dinámica Industrial*.

<sup>8</sup> En el ámbito industrial, la simulación consiste en colocar en un ordenador las condiciones que describen las operaciones efectuadas por la empresa y, a partir de las mismas, probar distintas políticas gerenciales e hipótesis en cuanto al mercado para así determinar el comportamiento esperado de la empresa en dichas situaciones y, en definitiva, las posibilidades de éxito de la misma. Así, el empleo de este método de simulación no requiere elevados conocimientos matemáticos, si bien deberá ser revisado por expertos en la materia.

<sup>9</sup>Mediante esta figura, Aracil recoge aquellas ciencias y metodologías que constituyen los antecedentes y el fundamento de la aparición de la dinámica de sistemas, p. 34 (Aracil, 1986).

En definitiva, estos modelos han servido tradicionalmente como base en los procesos decisorios. Los métodos tradicionales de gestión se basan en la experiencia acumulada del decisor, experiencia basada en información disponible sobre situaciones previas. De todo el conjunto de información que implica la experiencia acumulada del decisor se extraen aquellas pautas que se repiten a lo largo del tiempo, a partir de las cuales se puede generalizar y hacer predicciones. De este modo, se perfilan modelos mentales acerca de las situaciones comunes y repetitivas a que se enfrenta aquel que toma las decisiones. Como consecuencia, se puede extraer que toda metodología que se emplee para la construcción de modelos mentales debe contener la opción de incluir la experiencia acumulada como parte de dichos modelos. La dinámica de sistemas, como metodología, incluye esta recomendación puesto que todo modelo construido mediante su aplicación estará basado en la opinión de expertos involucrados en el sistema que se desee representar.

En segundo lugar, la figura 1.1 hace referencia a la *teoría de sistemas* y a la *cibernética*. La dinámica de sistemas ha recogido en su metodología estudios acerca de sistemas realimentados no lineales desarrollados por la cibernética. También a este respecto, la teoría de sistemas realimentados proporciona una serie de estructuras básicas que subyacen a un gran número de sistemas y que permiten generar una gran variedad de comportamientos dinámicos presentes en la realidad.

Para finalizar, gracias al desarrollo de la *informática* es posible obtener en poco tiempo y con un bajo coste los cálculos implícitos a un modelo, facilitando la simulación sucesiva con el modelo de situaciones o condiciones alternativas cuyos efectos se pretenden analizar.

De acuerdo con estas tres corrientes –cibernética, teoría general de sistemas e informática–, la dinámica de sistemas pretende la elaboración de modelos dinámicos en los cuales se recojan los bucles de realimentación detectados en el sistema real, y todo ello empleando como herramienta básica para la simulación el ordenador. Además, es fundamental que dichos modelos reflejen la opinión de aquellos expertos que posean información y estén íntimamente vinculados al sistema objeto de análisis. Es decir, la participación de personas involucradas en el sistema (Vennix y Gubbels, 1992), y que en definitiva son las que poseen modelos mentales del mismo, es un requisito fundamental para la consecución de un modelo de aceptable aplicabilidad. En conclusión, la dinámica de sistemas puede ser considerada como un lenguaje para la expresión de modelos que reflejen el comportamiento de sistemas sociales.

## **2. Concepto de simulación**

El término *simulación* comenzó a ser empleado a partir de 1949 y desde entonces se han establecido diversas definiciones del mismo. Shannon, en 1975 definió simulación como "el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con él, con la finalidad de aprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema". Un modelo, en definitiva, representará una forma simplificada de un sistema, entendiendo por sistema una representación de un conjunto de objetos o ideas que están interrelacionados entre sí como una unidad para la consecución de un fin. Simon (1978, p. 31) afirma que "*llamamos ahora "simulación" a la imitación y tratamos de comprender el sistema imitado poniendo a prueba la simulación dentro de una gran variedad de medios simulados o imitados*". En definitiva, define simulación como una técnica para la comprensión y predicción del comportamiento de unos sistemas, pudiendo incluso adoptar la forma de un experimento intelectual, jamás llevado a la práctica dinámicamente.

Existen dos procedimientos para obtener modelos matemáticos de un sistema real: análisis teórico y análisis experimental. El primero de ellos consiste en realizar un estudio cualitativo inicial de los comportamientos físicos que caracterizan el comportamiento dinámico y estático del sistema, para ser recogido posteriormente en ecuaciones matemáticas concretas que describan el proceso sistémico. Sin embargo, en ocasiones las matemáticas no

son capaces de ofrecer soluciones generales para sistemas con un elevado grado de complejidad, por ello debe recurrirse al segundo procedimiento: el análisis experimental.

*El análisis experimental* consiste en elaborar un modelo matemático a partir de medidas tomadas directamente del sistema, de modo que describa el comportamiento del mismo a lo largo del tiempo. A continuación se observa el comportamiento del modelo a fin de establecer si coincide o es similar al comportamiento real observado y, en caso de que así sea, efectuar experiencias con el mismo para poder resolver preguntas concretas acerca del sistema representado a través del modelo. Este proceso que se acaba de mencionar, consistente en efectuar experimentos con el modelo es lo que se denomina "simulación".

Si bien las dos primeras fases descritas, consistentes en el análisis y construcción del modelo, son comúnmente empleadas en muchas técnicas, la tercera fase es específica y característica de la simulación, ya que los experimentos realizados sobre el modelo tienen por objeto, no el obtener conocimiento acerca del sistema, sino de su comportamiento ante diversas situaciones previamente definidas. Teniendo esto en cuenta, se puede concluir que la simulación es una técnica que permite analizar el comportamiento de un sistema conocido en unas circunstancias determinadas.

Por último, es necesario señalar que, una mayor disposición a hacer abstracción de los detalles de un fenómeno, facilita la simulación del mismo; asimismo, no es necesario conocer toda la estructura interna del sistema, sino únicamente aquella parte del mismo, básica para la abstracción (Simon, 1969, p. 35).

#### Ventajas e inconvenientes de la simulación

A continuación se enumeran una serie de situaciones en que el uso de la simulación es considerado adecuado<sup>10</sup>:

VENTAJAS	INCONVENIENTES
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Situaciones en que no existe una formulación matemática del sistema objeto de análisis, o bien existe la formulación matemática correspondiente pero no los modelos analíticos de resolución de la anterior.</li> <li>• Situaciones en que existen los métodos y el modelo, pero el procedimiento es excesivamente complejo.</li> <li>• Situaciones en que se desea experimentar con el modelo antes de construir el sistema correspondiente.</li> <li>• Situaciones en las que resulta imposible experimentar sobre el sistema</li> <li>• Situaciones en las que la experimentación es posible pero razones de tipo ético lo impiden, por el riesgo que pueden entrañar.</li> <li>• Situaciones en las que el sistema acerca del cual se desea obtener información evoluciona muy lentamente. En estos casos, la simulación permite reducir ese horizonte temporal.</li> <li>• Permite estudiar sistemas dinámicos en tiempo real.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La complejidad, el elevado coste y la inversión en tiempo que puede acarrear la elaboración de un modelo de simulación que recoja adecuadamente el comportamiento de un sistema dinámico.</li> <li>• El riesgo de no incluir en el modelo algún elemento o variable aparentemente innecesaria y que, por su importancia, conduzca a que los resultados obtenidos con el modelo sean falsos.</li> <li>• La dificultad o incluso imposibilidad de conocer el nivel de imprecisión de los resultados obtenidos de la simulación.</li> </ul>

*Tabla 2.1: Ventajas e inconvenientes de la simulación*

Ya en el ámbito de la dinámica de sistemas, se define simulación como el proceso de realización de experimentos sobre un modelo en lugar de hacerlo con un sistema real (Forrester, 1961, p. 18). Esta definición coincide con la dada por Shannon (1975), si bien la diferencia fundamental se desprende del tipo de modelo empleado para la experimentación.

<sup>10</sup>Estas situaciones aparecen recogidas en Shannon (1975) *Systems Simulation* (The Art and Science) Prentice Hall. Inc. New Jersey.

En este caso, el modelo toma el lugar del sistema real y se simula su funcionamiento en circunstancias que son tan reales como fue la descripción original del sistema<sup>11</sup>.

En definitiva, la simulación en la dinámica de sistemas permite observar los efectos que la adopción de una nueva política o de una nueva forma organizativa tendrán sobre el sistema real. Las ventajas de este método frente a la experimentación sobre el sistema real son las siguientes:

- Su bajo coste, puesto que únicamente se requiere invertir en la elaboración del modelo mientras que la adopción de cualquier medida en el sistema real implicaría la inversión de fuertes sumas.
- La eliminación del riesgo de adopción de políticas inadecuadas. Las repercusiones de la adopción de una política inadecuada afectarán a todo el sistema y sus efectos negativos perdurarán en el largo plazo.
- La simulación mediante un modelo supone un ahorro de tiempo, puesto que, una vez elaborado el modelo, la simulación de una posible política o situación se efectúa en un momento. Por el contrario, la adopción de decisiones en el sistema real requiere mayor inversión en tiempo para su discusión y puesta en práctica y sus efectos se manifestarán en el largo plazo.

### **3. Microestructuras básicas**

La detección de estructuras subyacentes en la evolución de los sistemas puede ser de gran utilidad a la hora de modelizar el comportamiento de un sistema concreto. De hecho, existen o se pueden describir una serie de estructuras elementales de realimentación que producen un comportamiento determinado y que ayudarán o facilitarán la búsqueda de relaciones estructurales últimas causantes de ese comportamiento dinámico.

En concreto, se pueden observar cinco estructuras simples de gran interés dado que aparecen en la práctica en gran número de sistemas reales<sup>12</sup>:

- Bucles de primer orden de realimentación negativa, asociados a procesos de autorregulación u homeostáticos.
- Bucles de primer orden de realimentación positiva, asociados a fenómenos de crecimiento.
- Bucles de segundo orden en los que se observan oscilaciones en la búsqueda de la consecución de un objetivo.
- Curvas de crecimiento en S, que modelan procesos de crecimiento muy comunes en la práctica.
- Fenómenos de acoplamiento entre dos bucles, de realimentación positiva y negativa respectivamente.

#### **3.1. Sistemas de primer orden**

Son sistemas de primer orden aquellos que poseen un único nivel en su estructura. Estos sistemas pueden estar formados por bucles de realimentación positiva y/o negativa, que darán lugar respectivamente a estructuras de crecimiento o autorregulación. Debe señalarse que los sistemas de primer orden no presentan oscilaciones. A continuación se

---

<sup>11</sup> Con ello se pretende señalar que la bondad o aplicabilidad del modelo y la credibilidad de los resultados obtenidos de la simulación dependen de la rigurosidad en su planteamiento y de la aceptabilidad de las hipótesis establecidas como punto de partida para su elaboración.

<sup>12</sup> Esta clasificación aparece en Aracil (1986) pp. 87-8. El autor describe a continuación cada una de las distintas estructuras mencionadas.



describen aquellos con realimentación negativa y posteriormente los de realimentación positiva.

*Sistemas de primer orden de realimentación negativa:* Estos sistemas se caracterizan porque su comportamiento viene determinado por la consecución de cierto objetivo, de ahí que se denominen también autorreguladores y homeostáticos, ya que en su comportamiento está implícita la definición y búsqueda de un objetivo. Gráficamente, la estructura más simple que recoja un sistema de primer orden de realimentación negativa, puede representarse a través del siguiente bucle y diagrama de flujos:

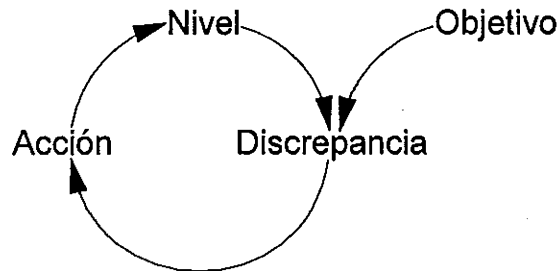


Figura 3.1.1: Diagrama causal de un sistema de primer orden con realimentación negativa

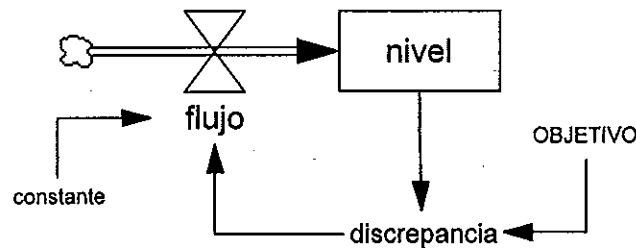


Figura 3.1.2: Diagrama de flujos de un sistema de primer orden con realimentación negativa

En el mismo, pueden distinguirse cuatro elementos que conforman dicha estructura: el objetivo, o nivel o estado deseado, la discrepancia o error, el flujo o acción correctiva y, finalmente, el nivel o estado real del sistema.

Partiendo del objetivo, éste se determinará externamente, se trata, por tanto, de una variable exógena. En la medida en que el nivel o estado real del sistema se aleje del nivel fijado como objetivo, surge una discrepancia o error, que deberá ser eliminada mediante la consiguiente acción correctora, que constituye el flujo del sistema. Dicha acción influye directamente en el nivel o estado real, que no es más que la acumulación de todas las acciones pasadas. Este comportamiento se producirá de forma recurrente buscando en todo momento ajustar el estado real al deseado<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> Las ecuaciones elementales correspondientes a un sistema de primer orden de realimentación negativa son:

$$\text{Nivel}(t) = \text{Objetivo} + (\text{Nivel}(0) - \text{Objetivo}) \times e^{-\text{constante} \times t}$$

$$\text{Flujo}(t) = \text{Discrepancia} \times \text{constante}$$

$$\text{Discrepancia} = (\text{Objetivo} - \text{Nivel}(t))$$

Los bucles negativos de primer orden generan comportamientos de crecimiento o decrecimiento asintótico, dependiendo de la relación entre el valor inicial del nivel y el objetivo<sup>14</sup>.

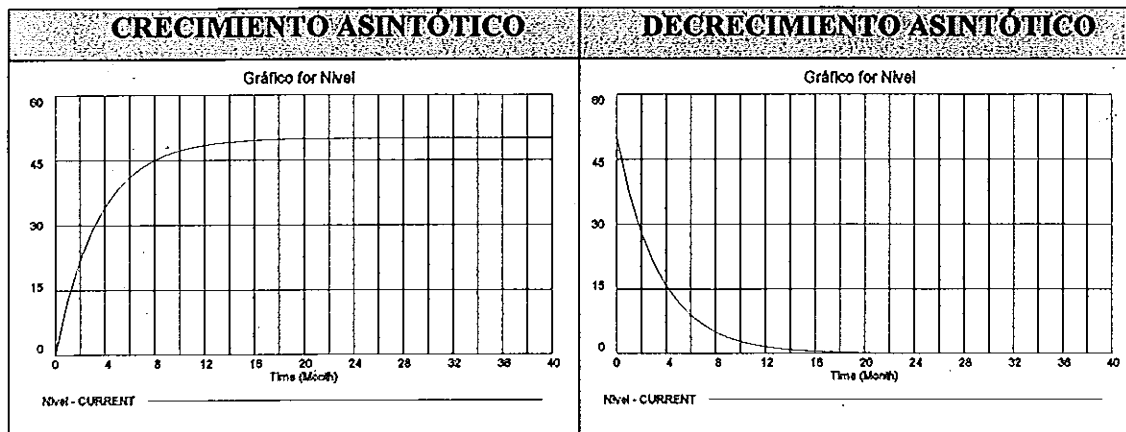


Figura 3.1.3: Comportamientos generados por un sistema de primer orden con realimentación

negativa

**Sistemas de primer orden con realimentación positiva:** Estos sistemas, frente a los de realimentación negativa, dan lugar a procesos de crecimiento o decrecimiento exponencial. El análisis de los sistemas de primer orden de realimentación positiva es análogo al efectuado para los sistemas de primer orden de realimentación negativa, sin embargo, a diferencia de estos últimos, en los de signo positivo no existe un objetivo a mantener o alcanzar<sup>15</sup>. Una característica de interés, y propia del crecimiento exponencial, el denominado tiempo de duplicación consistente en el tiempo en el cual el nivel objeto de estudio se duplica<sup>16</sup> (Aracil, 1986, p. 102).

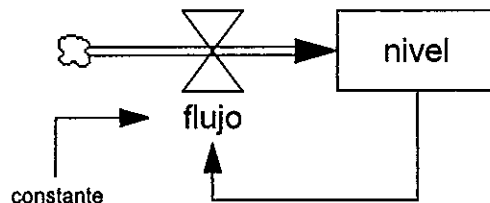


Figura 3.1.4: Diagrama de un diagrama de primer orden con realimentación positiva

En la siguiente tabla aparecen recogidos los comportamientos que puede generar un bucle positivo de primer orden.

<sup>14</sup> Si el nivel inicial es superior al objetivo, el comportamiento resultante es de decrecimiento asintótico, mientras que, por el contrario, si es inferior al objetivo, será de crecimiento asintótico. Por último, si el nivel inicial y el objetivo coinciden, el sistema permanece en equilibrio.

<sup>15</sup> Las ecuaciones correspondientes a un bucle positivo de primer orden son:

$$Flujo(t) = constante \times Nivel(t)$$

$$Nivel(t + \Delta t) = Nivel(t) + \Delta t \times Flujo(t)$$

<sup>16</sup> El tiempo de duplicación  $T_d = 0.7 \times T$ ; siendo  $T$  la inversa de la constante.

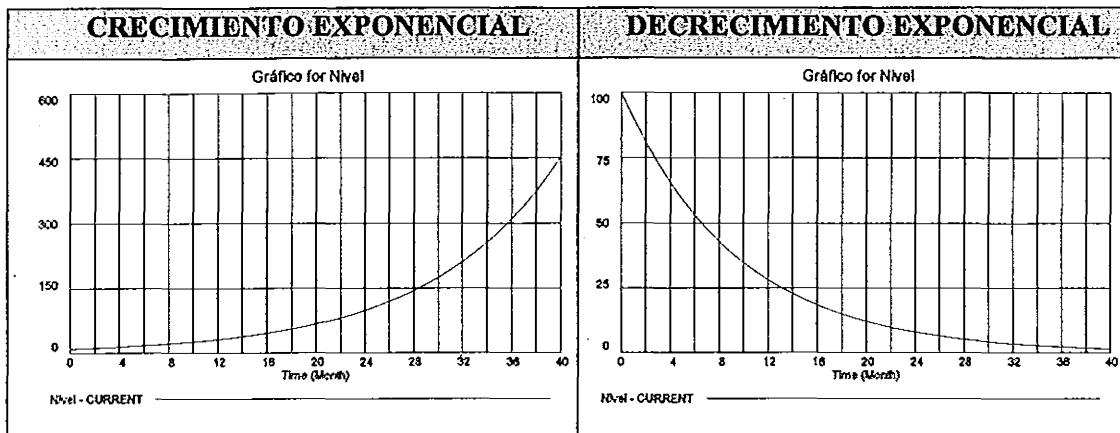


Figura 3.1.5: Comportamientos generados por un sistema de primer orden con realimentación

positiva

**Crecimiento en S:** El crecimiento en S también es denominado crecimiento sigmoidal o crecimiento logístico. En este caso, en la evolución de la variable se observan dos fases o etapas claramente diferenciadas: una fase de crecimiento exponencial y una segunda fase de decrecimiento asintótico. En la primera fase, por tanto, se produce un crecimiento exponencial, similar al observado en los sistemas de realimentación positiva, mientras que en la segunda fase, de decrecimiento asintótico, el comportamiento es similar al observado en los sistemas de realimentación negativa. Este esquema de comportamiento en S se observa en multitud de casos en la realidad. Gráficamente, el crecimiento en S podría representarse tal y como se muestra en la siguiente figura:

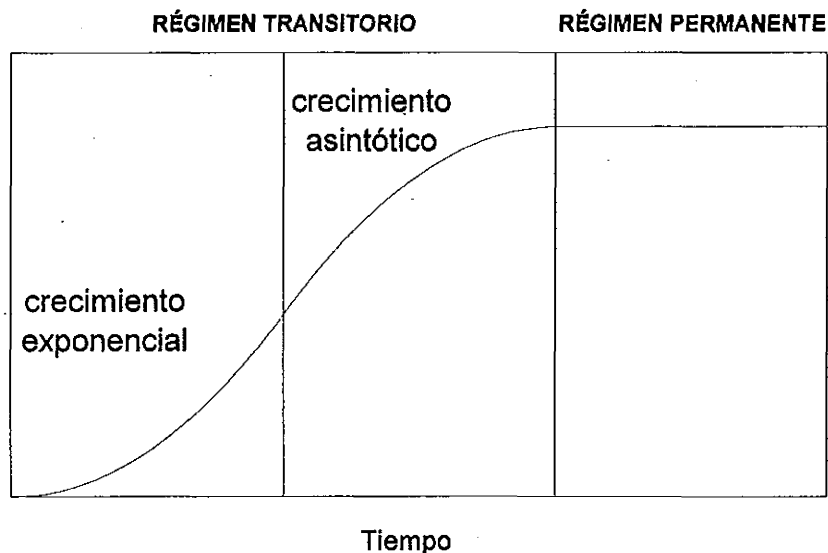


Figura 3.1.6: Crecimiento en S de una variable

Asimismo, este comportamiento puede representarse mediante el diagrama causal que se muestra a continuación, y en el que se observan claramente los dos bucles de realimentación, uno positivo y otro negativo:

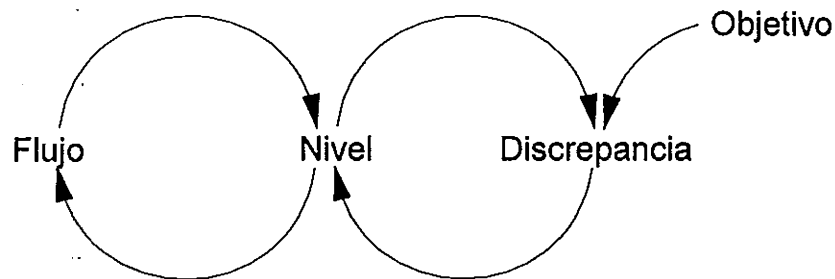


Figura 3.1.7: Diagrama causal de crecimiento en S

### 3.2. Sistemas de segundo orden

Los sistemas de segundo orden son aquellos que presentan dos niveles en su estructura, los cuales se hallan encuadrados en un total de hasta tres bucles de realimentación, uno de ellos el principal y los otros dos secundarios, de modo que el bucle principal conecta entre sí los dos niveles, mientras que los secundarios conectan cada nivel consigo mismo, tal y como se recoge en el siguiente diagrama causal:

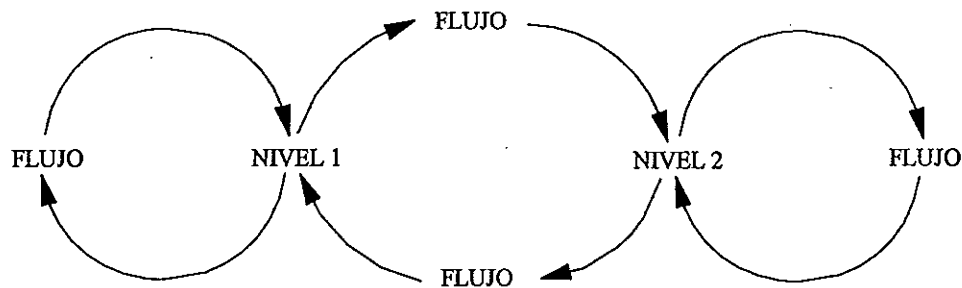


Figura 3.2.1: Diagrama causal de un sistema de segundo orden

Fuente: Aracil (1986, p. 116)

En contraposición a los sistemas de primer orden, los sistemas de segundo orden pueden presentar oscilaciones, si bien ésta no es una característica que se cumple en todos los sistemas de este tipo. Al margen de esta consideración, los sistemas de segundo orden pueden presentar distintos tipos de oscilaciones (Aracil, 1986, pp. 117-22): amortiguadas o sobreamortiguadas, mantenidas o no amortiguadas, crecientes o subamortiguadas.

Cada uno de estos tipos de oscilaciones aparece recogido en la siguiente figura:

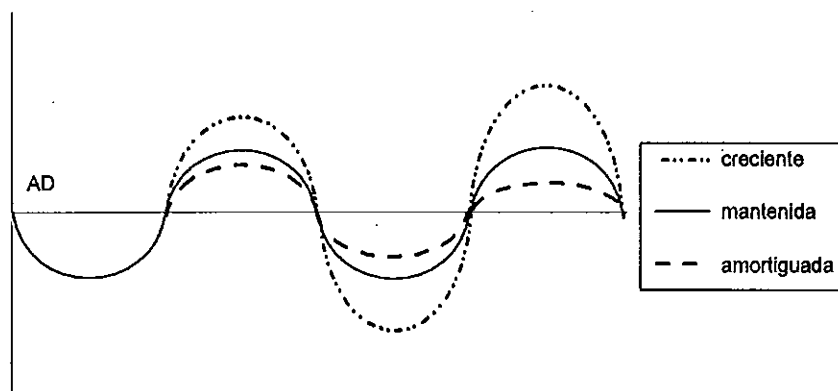


Figura 3.2.2: Tipos de oscilaciones de segundo orden

Fuente: Aracil (1986, p.108)

### 3.3. El sistema como conexión de bucles de realimentación

Si bien hasta el momento se han descrito las distintas estructuras elementales que aparecen de un modo recurrente y que justifican comportamientos observados en los sistemas, sin embargo, en la realidad, estas estructuras no aparecen normalmente aisladas

sino que se acoplan o vinculan entre sí, dando lugar a sistemas complejos con sus correspondientes pautas, en muchos casos antiintuitivas, de comportamiento. De este modo, la conexión que se establece entre los distintos bucles da lugar a o determina los rasgos específicos y peculiares de comportamiento de conjunto observado, comportamiento que, en último término, dependerá de la mayor o menor preponderancia de un determinado bucle sobre los demás que conforman el sistema en un momento determinado.

Por tanto, puede concluirse que, si bien puede efectuarse un análisis generalizado de las estructuras elementales, a la hora de analizar un sistema en concreto, deberá realizarse un estudio específico y personalizado del sistema cuyo comportamiento se observa. Al margen, en la práctica tiende a detectarse con cierta reiteración un comportamiento consecuencia del acoplamiento de dos bucles descritos con anterioridad: uno de crecimiento exponencial y un segundo de realimentación negativa en el que se produce una no-linealidad de saturación.

#### 4. Retrasos o demoras

La existencia de retrasos en las relaciones causa-efecto entre variables constituye un aspecto clave de la dinámica de sistemas e implica que los efectos de las decisiones o políticas adoptadas se ponen de manifiesto tras un período de tiempo, no de forma inmediata, sino en el largo plazo. Tal y como expone Hamilton (1980, p. 163), se requiere tiempo para reconocer un problema, tomar una decisión al respecto e implementar la misma. Así, el decisor ha de ser consciente de su existencia y comprender los retrasos con el fin de prever las consecuencias de sus acciones. Muchas de las decisiones adoptadas pueden ser erróneas y provocar efectos contrarios a los deseados si se subestima la duración de una demora. El tiempo es un aspecto fundamental a la hora de estudiar el comportamiento de un sistema dinámico puesto que su evolución discurre a través del tiempo. Así, los retrasos en la transmisión de información o en los flujos de materiales deben ser tomados especialmente en cuenta (Aracil, 1986, p. 129). Se puede afirmar que existe una demora cuando *la relación causal que liga dos variables puede implicar una transmisión para la que se requiera el transcurso de un cierto tiempo*. Por ello, los retrasos suponen una acumulación de material o información, dependiendo de cual sea la variable que se transmita, con la consiguiente aparición de nuevos niveles frente a los ya existentes.

En todo retraso han de ser tenidos en cuenta dos aspectos (Hamilton, 1980, p.163): su duración total, es decir, el tiempo requerido para que los efectos de una acción se pongan de manifiesto plenamente, y su forma, es decir, si es disperso o concentrado, si los efectos se manifiestan de modo inmediato o únicamente después de haber transcurrido un cierto período de tiempo. Así, los retrasos se definen a través de dos parámetros: *duración media* y *orden*. En cuanto al orden de un retraso, es una integral mayor o igual a la unidad que determina la forma del mismo. Un retraso de primer orden de una variable origina una media exponencial de los valores pasados de esa variable, otorgando más peso a los valores más recientes, mientras que un retraso de orden  $n$  es una secuencia de  $n$  retrasos de primer orden. En consecuencia, las demoras de menor orden originan una respuesta más inmediata y dispersa en contraposición a los de mayor orden, que provocan respuestas diferidas en el tiempo y más concentradas. Asimismo, es necesario señalar que el orden de un retraso viene determinado por el número de niveles intermedios existentes en el mismo, de modo que un retraso de orden  $n$  implica la existencia de  $n$  niveles intermedios.

Todo retraso puede ser analizado a través de la evolución temporal de los efectos que produce. Esta evolución temporal se pone de manifiesto a través de dos características genéricas: *la duración media* y *su respuesta transitoria*. En cuanto a la primera de ellas, determina el "estado o situación estable" del retraso correspondiente, que equivale a una situación en que los flujos de entrada y salida son iguales, de modo que el nivel mantiene un valor constante. En este caso, el valor del nivel intermedio del retraso puede obtenerse como el producto del valor del flujo de salida y la duración media de la demora. En cuanto a la *respuesta transitoria*, ésta recoge la relación entre las evoluciones dinámicas de los flujos de entrada y salida en el tiempo y vendrá determinada por el orden del retraso.

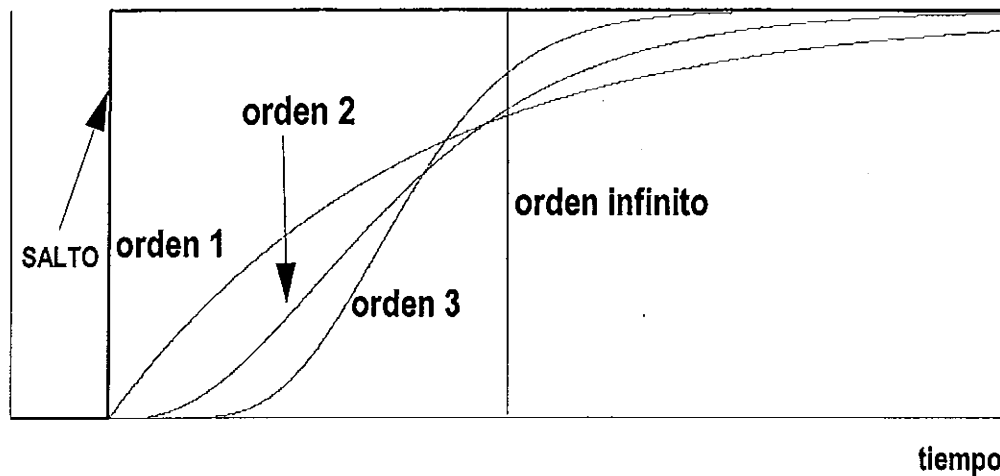


Figura 4.1: Respuesta transitoria ante un salto en el flujo de entrada, en función del orden del retraso

Como ya se ha mencionado, puede establecerse una distinción entre retrasos en la transmisión de información y retrasos en la transmisión de bienes materiales. Respecto a estos últimos, surgen cuando los materiales que fluyen por el sistema se almacenan en algún punto del mismo, como por ejemplo materias primas, bienes de consumo o personal. En cuanto a los retrasos en la transmisión de información, surgen como consecuencia de la necesidad de acumular la información necesaria para efectuar la toma de decisiones.

#### 4.1. Retrasos materiales

Partiendo del supuesto más sencillo, es decir, un retraso material de orden uno, en este caso existirá un único nivel intermedio de acumulación. Su estructura interna, es decir, el diagrama de flujos correspondiente se representa del siguiente modo:

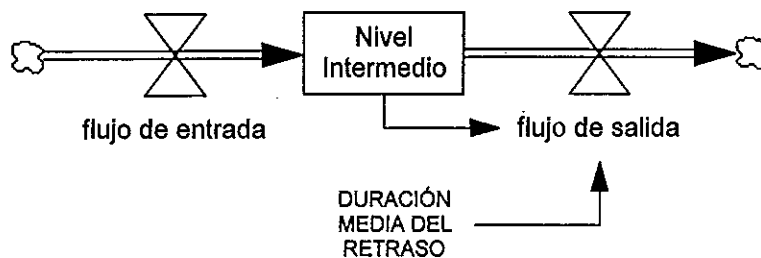


Figura 4.1.1: Diagrama de flujo de un retraso material de primer orden

En este caso, la variable *flujo de salida* se obtendrá como el cociente entre la variable *nivel intermedio* y la variable *duración media del retraso*. Es decir, el flujo de salida dependerá del nivel material acumulado en el retraso y de la demora de tiempo que, por término medio, implica ese retraso.

La estructura anterior puede generalizarse para retrasos de orden  $n$ , cuya estructura interna podría representarse mediante el siguiente diagrama de flujos:

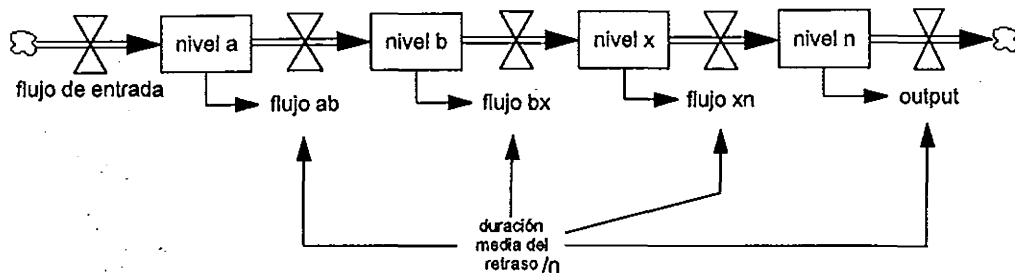


Figura 4.1.2: Diagrama de flujo de un retraso material de orden  $n$

En este caso, el valor de las variables flujo en cada momento se calcularán mediante el cociente entre el nivel inmediatamente anterior y la duración media del retraso/ $n$ ; así, por ejemplo:

$$\text{Flujo } ab = \text{Nivel } a / (\text{duración media del retraso}/n)$$

$$\text{Output} = \text{Nivel } n / (\text{duración media del retraso}/n)$$

#### 4.2. Retrasos de información

Como ya se ha mencionado, estos retrasos surgen como consecuencia de la necesidad de acumular la información necesaria para la toma de decisiones. Los retrasos de información son retrasos en la percepción de un cambio o en la reacción al mismo. El objetivo al introducir estos retrasos es aislar los cambios significativos, restando peso a las fluctuaciones no significativas en la evolución de determinadas variables; para ello se emplean procesos de ajuste, alisados o promedios.

A continuación se recoge el diagrama de flujos correspondiente a un retraso de información de primer orden.

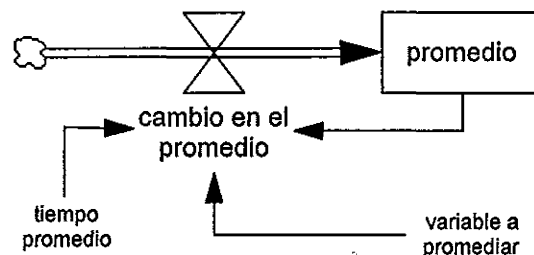


Figura 4.2.1: Diagrama de flujo de un retraso de información de primer orden

En este caso, la variable *Cambio en el promedio* se obtiene como el cociente entre la diferencia del valor de la variable a promediar y el promedio entre el tiempo que se emplea para promediar, es decir:

$$\text{Cambio en el promedio} = (\text{variable a promediar} - \text{Promedio}) / \text{tiempo promedio}$$

A partir del anterior, del mismo modo que se expuso para los retrasos materiales, la representación de un retraso de información de orden  $n$  implicaría introducir en el diagrama de flujos  $n-1$  niveles adicionales. La representación en este último caso sería la siguiente:

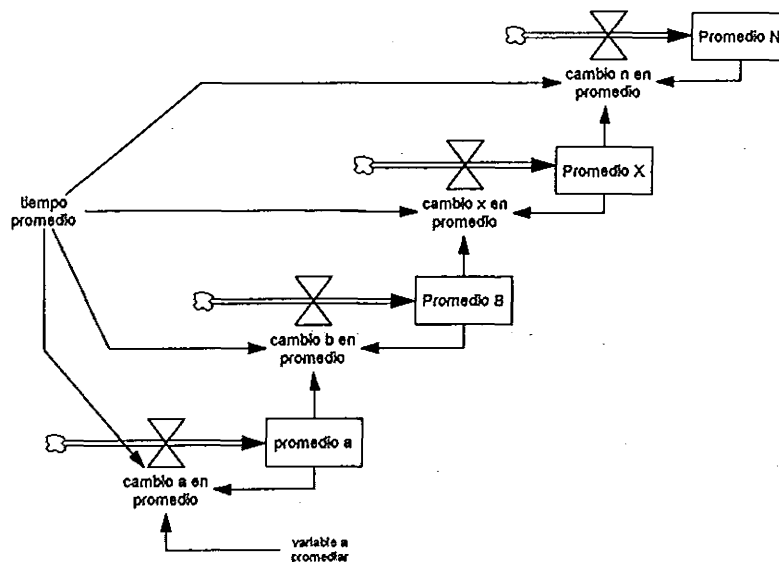


Figura 4.2.2: Diagrama causal de un retraso de información de orden  $n$

En este caso, el *cambio  $n$  en promedio* se obtendrá como el cociente entre la diferencia del promedio inmediatamente anterior, es decir,  $n-1$  (en la figura equivalente a  $x$ ) y el promedio  $n$  y el tiempo empleado para promediar entre  $n$ ; es decir:

$$\text{Cambio } n \text{ en promedio} = (\text{Promedio } x - \text{Promedio } n) / (\text{Tiempo promedio} / n)$$

Puesto que la información se promedia con el fin de ser empleada en la toma de decisiones, es necesario señalar el efecto que el tiempo empleado para promediar dicha información tiene sobre la misma (Lyneis, 1980). En la medida en que se empleen tiempos promedios elevados, la información final obtenida estará más alisada y, por tanto, libre de comportamientos no significativos; sin embargo, ello supondrá una menor puntualidad de la misma. Por el contrario, si el tiempo que se toma para promediar es pequeño, entonces la información será más puntual, pero ello a costa de una reducción en su precisión, puesto que no será posible aislar los cambios significativos respecto a los que no lo son. En definitiva, el establecimiento de la duración del tiempo promedio deberá estar guiada por un compromiso entre puntualidad y precisión, siendo conscientes de que ambos objetivos son contradictorios.

Tiempo promedio	Precisión	Puntualidad
Alto	+	-
Bajo	-	+

Figura 4.2.3: Efecto de la duración del tiempo promedio en la precisión y puntualidad de la información

## 5. Construcción de un modelo de dinámica de sistemas. Descripción de sus fases

### 5.1. Fases en la elaboración de un modelo dinámico

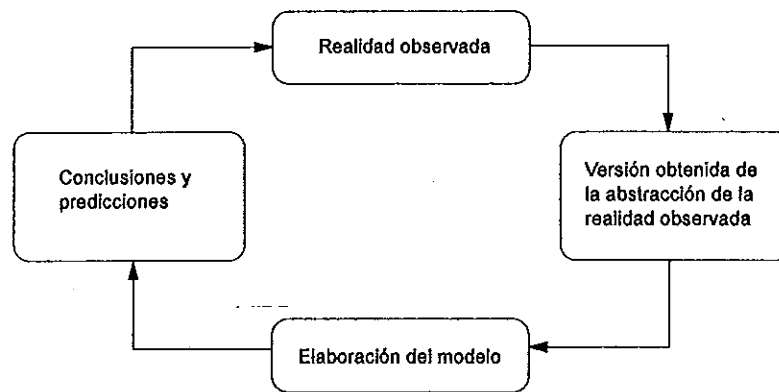
Varios son los autores que han centrado su atención y determinado la importancia de seguir con cierto orden unas pautas de actuación a la hora de elaborar un modelo dinámico. Con carácter general, Wolstenholme (1992, pp. 123-24) considera la existencia de dos vías básicas que pueden ser empleadas para la construcción de modelos dinámicos. De este modo, distingue dos posibles enfoques: *el enfoque de los bucles de realimentación* y *el enfoque*



*modular*. Respecto al primero de ellos, se fundamenta en el hecho de que ciertos tipos de bucles simples de realimentación dan lugar a ciertos tipos de comportamiento sistémico; por tanto, si es posible conocer el modo de referencia en el comportamiento de un sistema, entonces será posible a su vez establecer o inferir los tipos de bucles que lo originan. En definitiva, este método de modelización implica la identificación y posterior conexión de bucles de realimentación, detectando y clasificando a continuación las variables intermedias fundamentales en variables nivel, flujo y auxiliar. El segundo enfoque, denominado *modular*, sigue un proceso prácticamente contrario al descrito anteriormente. En este caso, se parte de una o dos variables fundamentales asociadas al problema que se analiza, intentando relacionar con las mismas ejemplos de procesos, información, retrasos, estrategias u organización. El componente empleado como punto de partida dependerá del propósito de la investigación y del tipo de sistema de que se trate.

Varios autores (Forrester, 1961; Richardson y Pugh, 1981; Aracil, 1986; Hannon y Ruth, 1994) han establecido a este respecto una serie de pasos o fases a seguir a tal fin, haciendo hincapié en la interdependencia existente entre dichas fases y, por tanto, en la posibilidad de alterar, en cierta medida su orden. A continuación se exponen los criterios o pautas establecidas por los autores antes mencionados.

En primer lugar, y de modo esquemático, Hannon y Ruth (1994, p.4) representan mediante un bucle de realimentación el proceso de construcción de un modelo.



*Figura 5.1.1: El proceso de construcción de un modelo*

*Fuente: Hannon y Ruth (1994, p.4)*

Los principios de modelización establecidos por estos autores son (Hannon y Ruth, 1994, pp. 7-8):

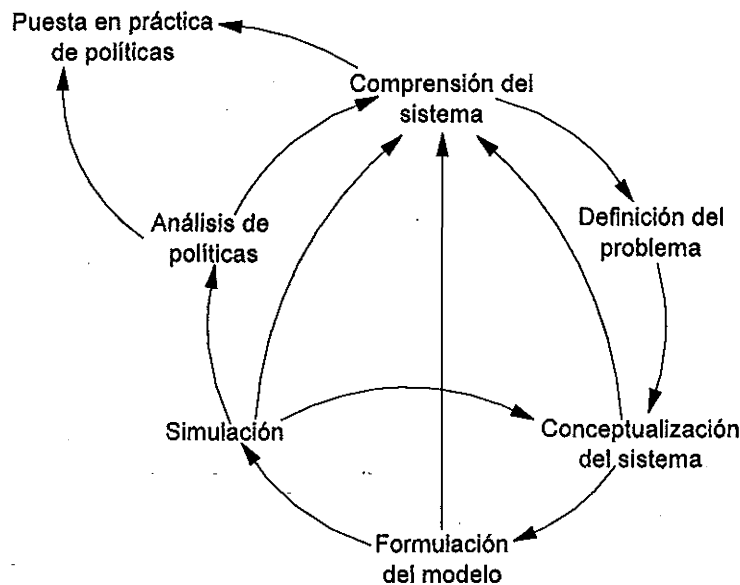
1. Definir el problema y los objetivos del modelo.
2. Designar las variables nivel que indicarán el estado del sistema. En este punto es fundamental mantener la simplicidad del modelo, evitando la complejidad en un principio.
3. Seleccionar las variables de control y los controles de flujo de entrada y salida de las variables nivel, tratando de captar únicamente los aspectos esenciales.
4. Seleccionar los parámetros correspondientes a las variables de control.
5. Examinar el modelo resultante en busca de posibles violaciones de leyes físicas o económicas, así como consistencia en las unidades de medida.
6. Establecer un horizonte temporal sobre el cual se pretende examinar el comportamiento dinámico del modelo, así como la longitud de cada intervalo de tiempo.
7. Simular el modelo, seleccionando distintas alternativas para la longitud de cada intervalo de tiempo y técnicas de integración.

8. Modificar los parámetros hasta sus valores extremos razonables y analizar los resultados de la simulación en cada uno de los casos. A continuación, revisar el modelo con el fin de reparar errores y anomalías.

9. Comparar los resultados con los datos empíricos recabados previamente.

10. Revisar los parámetros e incluso el modelo entero, con el fin de reflejar mayor complejidad y encontrar excepciones a los resultados experimentales, repitiendo todos los pasos que se acaban de enumerar.

Como puede observarse, los pasos establecidos por Hannon y Ruth (1994) se centran casi exclusivamente en aspectos técnicos de la elaboración del modelo, tales como el orden en el establecimiento del tipo de variables, fijación del período de simulación o de la longitud de los intervalos de tiempo a emplear. A este respecto, Richardson y Pugh (1981, pp. 15-17) ofrecen o presentan una visión más genérica de este proceso, alejándose en alguna medida de los problemas técnicos de la modelización. En la siguiente figura se recoge la aportación de estos autores en relación con el proceso de modelización.



*Figura 5.1.2: Síntesis del enfoque del proceso de modelización en dinámica de sistemas*

*Fuente: Richardson y Pugh (1981, p.17)*

A partir del diagrama causal recogido en la figura anterior, los autores establecen siete fases para el enfoque de un problema desde la perspectiva de la dinámica de sistemas:

- Identificación y definición del problema.
- Conceptualización del sistema.
- Formulación del modelo.
- Análisis del comportamiento del modelo.
- Evaluación del modelo.
- Análisis de políticas.
- Implementación o empleo del modelo.

Según establecen los autores, el proceso se inicia y finaliza con la comprensión del sistema y de los problemas que pueden observarse en el mismo, formando un bucle y no una progresión lineal; de este modo, se observa como el proceso es de naturaleza iterativa.

Este enfoque más amplio a la hora de establecer las fases para la modelización, se adecua más al adoptado por Forrester (1961, p.13). Este último estableció una serie de pasos de acercamiento de la dinámica industrial al diseño de empresas. Si bien en principio el autor aplicó esta metodología únicamente al ámbito empresarial, posteriormente fue aplicado a

cualquier tipo de sistema de comportamiento real. En concreto, estableció diez pasos o fases, tal y como se enuncian a continuación: Con carácter general, para el planteamiento y elaboración de cualquier modelo que recoja un comportamiento dinámico deben seguirse los siguientes pasos<sup>17</sup>:

1. *Identificación del problema.* En primer lugar, es necesario detectar o identificar y posteriormente definir el problema que se pretende resolver mediante la aplicación del modelo. Dicho problema, para poder ser modelado, ha de cumplir una serie de requisitos; es decir, ha de tratarse de un problema dinámico en el cual pueda detectarse algún tipo de realimentación.

2. *Aislamiento de los factores que parecen interactuar para crear los síntomas observados.* Una vez definido el problema, es preciso identificar aquellos factores considerados relevantes que parecen interactuar y ser los causantes del problema de partida. En esta fase, debe tenerse en cuenta que todo modelo es una simplificación de la realidad y que, por tanto, no puede pretender recoger o reflejar todas las variables realmente existentes sino aquellas más significativas. En definitiva, debe establecerse un límite a la realidad que se pretende reflejar con el modelo.

3. *Trazado de los circuitos de realimentación de información causa-efecto, que unen las decisiones con la acción, con los cambios resultantes de la información y con las nuevas decisiones.* Es decir, deben detectarse los circuitos o bucles de realimentación existentes y que enlazan las decisiones con las acciones. Con ello se pretende demostrar cómo la situación actual del sistema analizado es consecuencia de las decisiones tomadas en el pasado y cómo esta situación actual constituye la base, a través de la información extraída de la misma, de las decisiones que se toman en el momento actual.

4. *Formulación de las políticas aceptables de decisión formal que describen cómo las decisiones surgen de las corrientes de información disponibles.* Una vez detectadas las realimentaciones existentes, la siguiente fase consistirá en formular las políticas que sirven de guía en la toma de decisiones dentro del sistema analizado. Dichas decisiones estarán basadas en la información referente a las variables significativas.

5. *Elaboración de un modelo matemático de las políticas de decisión, fuentes informativas de interacción de los componentes del sistema.* Teniendo en cuenta las variables y decisiones detectadas en las fases tercera y cuarta respectivamente, se elaborará un modelo matemático que recoja las políticas de decisión previamente definidas, así como las fuentes de información existentes. En definitiva, este modelo, compuesto por una serie de ecuaciones, pretende reflejar el comportamiento real del sistema objeto de análisis a través de las interacciones existentes entre las variables incluidas en el mismo.

6. *Generación del comportamiento del sistema en el tiempo según lo descrito en el modelo.* A partir de las ecuaciones que componen el modelo matemático, se generará el comportamiento o evolución del sistema estudiado a lo largo del tiempo.

7. *Comparación de los resultados con todo el conocimiento pertinente disponible acerca del sistema real.* Los resultados obtenidos en la fase anterior serán contrastados con los datos disponibles acerca de la evolución real. En la medida en que los resultados obtenidos de la simulación con el modelo se aproximen a la evolución real, el modelo será validado. Sin embargo, en esta fase debe tenerse en cuenta que el modelo es una simplificación de la realidad y que, por tanto, debe exigirse una similitud y no una exactitud en las pautas evolutivas.

8. *Revisión del modelo hasta tanto sea aceptable como representación del sistema real.* En el supuesto de que los resultados no permitan concluir que el modelo es válido para

---

<sup>17</sup>Estas fases o pasos aparecían ya recogidas por este autor en Forrester, J. W. (1961), pp. 13-14 y con posterioridad por Richardson y Pugh (1981) pp. 15-17.

la simulación, deberá revisarse hasta obtener un modelo con una fiabilidad aceptable para la representación del sistema real.

9. *Nuevo planteamiento, dentro del modelo, de las relaciones y políticas de organización que pueden alterarse en el sistema real, para decidir los cambios que mejoren el comportamiento del mismo.* Una vez que el modelo ha sido contrastado, podrá ser empleado para la simulación de nuevas políticas frente a las ya existentes con el fin de establecer cuales son los cambios adecuados para mejorar el comportamiento o evolución del sistema en su conjunto.

10. *Alteración del sistema real en las direcciones que la experiencia con el modelo hayan demostrado como conducentes a una actuación avanzada.* En definitiva, esta última fase consistirá en llevar a la práctica aquellas políticas o decisiones que, como consecuencia de la simulación se han perfilado como las más adecuadas para eliminar las alteraciones o fluctuaciones detectadas en la evolución del sistema.

Un factor fundamental para concluir con éxito cualquier modelo es la participación del cliente, o entidad interesada en su elaboración, en la construcción del mismo (Vennix y Gubbels, 1992). Si bien ésta última correrá a cargo de individuos especializados en la materia, no debe olvidarse que son los miembros de la organización o sistema cuyo comportamiento se quiere modelizar quienes poseen los modelos mentales que se pretenden reflejar. Por tanto, será necesario contactar con ellos e implicarlos en las fases de elaboración a fin de que comprendan su utilidad, aporten sus conocimientos acerca del sistema y sugieran qué factores deben ser considerados como relevantes.

## **5.2. Evaluación generalizada de modelos dinámicos**

Uno de los aspectos de mayor importancia en el proceso de construcción de un modelo dinámico es el carácter iterativo de todo el proceso. El proceso de modelización no es un proceso lineal, sino que algunas de las fases del mismo deberán ser repetidas varias veces con el fin de perfeccionar el modelo final. Incluso, en ocasiones, se construyen sucesivamente varios modelos hasta obtener el definitivo.

Se establecen una serie de recomendaciones a tener en cuenta a la hora de evaluar cualquier modelo (Aracil, 1986):

El criterio empleado en las ciencias físicas, consistente en evaluar los modelos o teorías en función de su capacidad para predecir acontecimientos concretos en determinados momentos de tiempo, no es operativo o aplicable para el caso de los sistemas sociales. Por tanto, como alternativa evaluadora se propone el concepto de *evaluación generalizada*<sup>18</sup>. La evaluación generalizada consiste en *la consideración de todos los aspectos del modelo, no sólo las predicciones, empleando todo el conocimiento disponible, no sólo los datos cuantitativos*. Se concluye con esto que el simple criterio de ajuste o comprobación estadística a los datos reales disponibles no es suficiente. La evaluación generalizada implica que la evaluación de cualquier modelo ha de basarse en aspectos descriptivos y, por tanto, no cuantitativos, que, en definitiva, son los aportados por especialistas y personal involucrado en el sistema cuyo comportamiento pretende recoger el modelo elaborado. De este modo, todo modelo puede ser evaluado mediante esta técnica en cada una de las fases de su elaboración. Por último, debe señalarse que aquel modelo que haya satisfecho con éxito esta evaluación generalizada y que, en consecuencia haya sido validado y considerado aceptable, no constituye por ello una representación única y completa de la realidad, es decir, el modelo no es único en el sentido de que numerosos modelos, todos ellos validos, podrían reflejar igualmente esa realidad.

---

<sup>18</sup>Este concepto, tal y como cita el autor, había sido previamente propuesto por Randers, J. (1973): *Conceptualizing Dynamics Models of Social Systems: Lessons from a Study of Social Change*. Ph. D. Thesis, MIT.

## 6. Importancia de la obtención de datos para la elaboración del modelo

A la vista de las fases para la elaboración de un modelo dinámico que represente el comportamiento del sistema generador del problema objeto de análisis —en este caso el hospital como generador de listas de espera—, se observa la necesidad de la obtención de información, tanto de naturaleza cuantitativa como cualitativa.

En cuanto los datos cuantitativos, éstos son necesarios para la detección de un patrón de referencia; de este modo, la validación del modelo<sup>19</sup> pasará por comprobar si, mediante la simulación, se refleja dicho patrón. La esencia de la validación es, precisamente, que el modelo sea consistente con toda la información disponible, en el contexto del propósito del modelo (Randers, 1980)<sup>20</sup>. La fase de contrastación de todo modelo implica la comparación de los resultados con todo el conocimiento pertinente disponible acerca del sistema real (Forrester, 1961; Richardson y Pugh, 1981)<sup>21</sup>. Así, los resultados obtenidos en la fase de generación del comportamiento del sistema mediante el modelo son contrastados con los datos disponibles sobre la evolución real. En la medida en que los resultados obtenidos con la simulación coincidan o se aproximen a la evolución real observada, el modelo es validado.

Ahora bien, la comprobación de que el comportamiento obtenido de la simulación con el modelo, reproduce la evolución histórica del sistema representado es un test “débil” en cuanto a su capacidad de aportar confianza en el modelo (Sterman, 1984, p. 52). Así, el empleo de los datos históricos reales para la validación es una parte relativamente importante del *test de reproducción del comportamiento*. Sin embargo, este último abarca o hace más hincapié en otros aspectos, tales como si los datos obtenidos de la simulación presentan los mismos modos de comportamiento, las mismas relaciones de fase, las mismas amplitudes relativas y la misma variabilidad que los datos reales.

Si bien la contrastación empírica a partir de los datos reales es un aspecto fundamental, más aún lo es la obtención de información cualitativa. La mayor parte de la información existente en una organización reside en los modelos mentales de sus miembros (Vennix y Gubbels, 1992)<sup>22</sup> y es este tipo de conocimiento el que ha de ser empleado y representado en el modelo. La toma de decisiones consiste en la transformación o conversión de información en acción, por lo que el éxito de la decisión dependerá de que la información empleada sea la correcta y de cómo se haya efectuado dicha conversión (Forrester, 1992). Puesto que son los decisores los que poseen los modelos mentales explicativos del comportamiento del sistema y son, además y en último término, los causantes de su evolución en cuanto que transformadores de la información en acción, su participación en la construcción del modelo es fundamental.

De hecho, señalan Vennix y Gubbels (1992) que diversos estudios, evaluadores del impacto de la elaboración de modelos de apoyo para los procesos de adopción de políticas organizativas, han indicado como prerequisite para su éxito la participación directa de los clientes, es decir, de los miembros de la organización. Mediante dicha participación se potencia una mayor calidad del modelo, puesto que son estos individuos quienes mejor conocen las variables empleadas en la toma de decisiones. Asimismo, favorece la comprensión por parte de los participantes de la gran variedad de interrelaciones y realimentaciones que se producen en el sistema y que, debido a su visión local y a corto plazo, no pueden ser detectadas de forma intuitiva. Por último, se potencia la aplicabilidad y

---

<sup>19</sup> Véase apartado 7, en el cual se desarrolla la validación de modelos.

<sup>20</sup> La aportación que aquí se recoge pertenece a Peterson, D. W., autor de *Statistical Tools for System Dynamics*, incluida en la parte V de la cita previa, referida a tests de validación.

<sup>21</sup> Véase Forrester (1961) pp. 13-14 y Richardson y Pugh (1981) pp. 15-17, para ver en detalle las distintas fases para la elaboración de un modelo dinámico.

<sup>22</sup> Citando a Forrester (1992).

posterior empleo del modelo, en la medida en que los miembros han participado en su creación y conocen su funcionamiento.

## 7. Validación del modelo

*"La validación, o grado de significación de un modelo, debería ser juzgado por su conveniencia con relación a un determinado propósito. Un modelo es correcto y defendible si consigue lo que se espera de él... la validación, como un concepto abstracto "divorciado" del propósito (que se persigue), no tiene sentido práctico" Forrester (1961, p.115)*

Uno de los aspectos fundamentales del desarrollo y posterior empleo de todo modelo dinámico es la validación del mismo. En la medida en que el modelo es correctamente validado, puede afirmarse que éste representa adecuadamente el comportamiento del sistema objeto de estudio, garantizándose de este modo su utilidad como instrumento de ayuda para la gestión del sistema. De hecho, a efectos prácticos, la preocupación se centra más en la utilidad que en la validez puesto que no existen modelos total o perfectamente "validos" puesto que siempre son una simplificación, es decir, algo menos que el sistema que se modeliza (Shreckengost, 1985).

Por tanto, y en este sentido, en primer lugar es necesario establecer qué se entiende por validación en el ámbito de la dinámica de sistemas. Forrester y Senge (1980, p. 210) definen la validación como el proceso de establecer confianza en la solidez y utilidad de un modelo. Este proceso se extiende desde el individuo que elabora el modelo hacia los potenciales usuarios del mismo<sup>23</sup>. Si, tal y como se acaba de mencionar, el objetivo último es alcanzar un adecuado nivel de confianza en la utilidad del modelo, es conveniente no olvidar que la utilidad depende de la subjetividad del sujeto, en este caso del potencial usuario del mismo (Shreckengost, 1985).

A este respecto, es necesario señalar que la validación es uno de los aspectos más controvertidos y que más críticas suscitan, dada la tendencia por parte de esta metodología al empleo de métodos cualitativos y, por tanto, en opinión de muchos, poco rigurosos para tal fin. Tal y como señala Sterman (1984, p. 51), esta actitud reacia al empleo de métodos de medida formales ha conducido en muchos casos al cuestionamiento de modelos dinámicos aún cuando presenta una más que adecuada correspondencia con la evolución histórica del sistema.

Varios autores, por los motivos antes expuestos, han centrado su atención en el desarrollo y propuesta de diversos métodos de validación (Barlas, 1989; Oliva, 1996). La idea que subyace a estas aportaciones es que la noción de una validación objetiva tienda a ser reemplazada por la confianza que, el que elabora el modelo y sus usuarios, tengan en el mismo y en las conclusiones obtenidas mediante su simulación (Sterman, 1984). De este modo, si el énfasis, como ya se ha mencionado, se pone en el proceso de "construir" o incrementar la confianza en el modelo; ello implica que no puede existir un único test o medida de validación (Forrester y Senge, 1980, p. 209). El grado adecuado de confianza ha de obtenerse a través de un proceso de prueba y evaluación que afecte a muchas dimensiones, es decir, una validación multietápica (Naylor y Finger, 1967).

Barlas (1989, p.59) defiende el empleo de dos tipos de validación: una validación *estructural* y una validación *del comportamiento*. De este modo, la *validación estructural* tiene por objeto comprobar en que medida la estructura del modelo es una representación

---

<sup>23</sup>Los autores hacen mención a la especial dificultad que entraña la validación de los modelos dinámicos debido a los distintos objetivos y criterios de evaluación de la "audiencia" a la que va dirigido. Así, para un científico el modelo será útil si le aporta una visión clarificadora de la estructura del sistema real y permite efectuar predicciones correctas. Por el contrario, para los potenciales usuarios, un modelo será útil si es capaz de explicar las causas que originan un determinado problema y proveen las bases para el diseño de políticas que mejoren el comportamiento en el futuro.

adecuada de la estructura real analizada. Dos son los métodos para lograr tal fin: en primer lugar, la comparación de las ecuaciones del modelo con las relaciones reales del sistema y que el autor denomina *validación estructural empírica*; en segundo lugar, la comparación de las ecuaciones del modelo con la teoría disponible, englobada bajo el término *validación estructural teórica*.

De un modo similar, la *validación del comportamiento* consta de dos partes diferenciadas: en primer lugar, *tests para la predicción de patrones o pautas de comportamiento*, cuya misión es determinar en que medida los patrones generados por el modelo se asemejan lo suficiente a los principales patrones mostrados por el sistema real; y en segundo lugar, *tests de comportamiento estructuralmente orientados*, que pretenden analizar el comportamiento del modelo bajo distintas condiciones, en ocasiones extremas, con el fin de determinar si existe algún error significativo en la estructura del modelo.

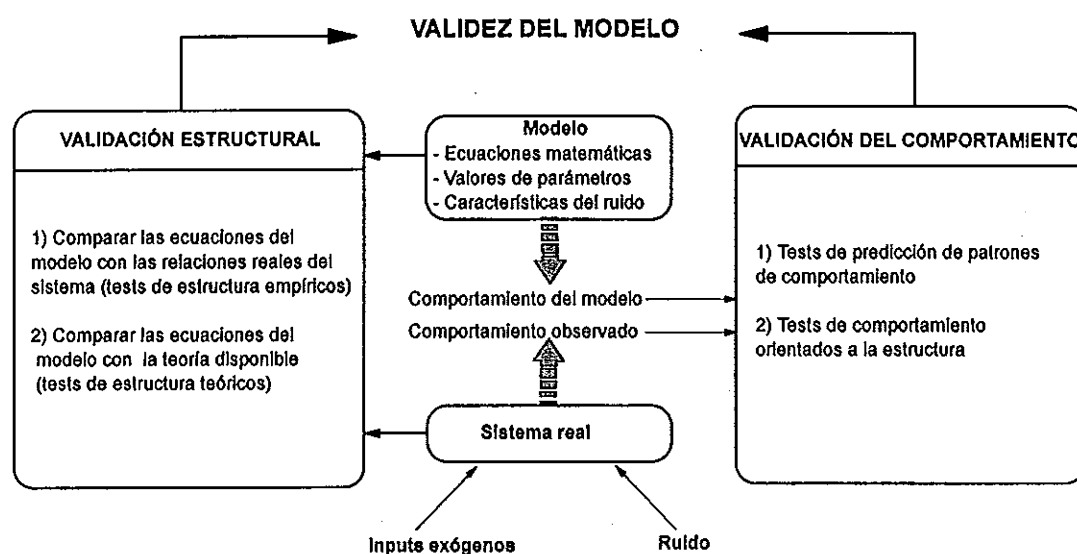


Figura 7.1: Principales aspectos de la validación de modelos dinámicos

Fuente: Barlas (1989, p. 60)

La figura anterior representa los cuatro tipos de test previamente mencionados, los cuales han de seguir, en su aplicación, un cierto orden lógico. Dicho orden implica, en primer lugar, la aplicación de los tests estructurales, a continuación los tests de comportamiento estructuralmente orientados y, por último, los tests de predicción de pautas de comportamiento. Barlas (1989, p. 60) establece este orden de aplicación argumentando que si no existe confianza en la capacidad del modelo de reproducir adecuadamente la estructura del modelo, no tendrá sentido analizar el mismo en cuanto a su capacidad predictiva o de detección de patrones o pautas de comportamiento<sup>24</sup>.

Por otro lado, si se ha comprobado que el modelo representa adecuadamente la estructura, entonces una capacidad predictiva escasa del mismo indica que uno o varios valores de los parámetros o variables exógenas no están adecuadamente representados en el modelo, mientras que, por el contrario, una capacidad predictiva fuerte aumenta la confianza en la utilidad del modelo.

Oliva (1996, pp. 405-6) aporta un enfoque más esquemático al problema de la validación de modelos dinámicos. En este sentido, el autor distingue tres grupos o etapas distintivas en los que se agrupan todas las actividades de investigación vinculadas a la tarea de validación:

<sup>24</sup>El autor hace hincapié en este aspecto puesto que puede darse la circunstancia de que un modelo con errores estructurales serios pueda, con una alteración "adecuada" de los parámetros generar predicciones de comportamiento extraordinariamente acertadas y precisas.

1. *Formalización y comprobación de la teoría:* En primer lugar es necesario integrar las aportaciones teóricas de las distintas disciplinas que aporten comprensión o conocimiento sobre el problema objeto de estudio. La teoría así extraída ha de ser articulada empleando un modelo dinámico junto con una detallada recopilación y evidencia obtenida de la literatura que apoye o justifique la estructura, las relaciones causales y la formulación implícita en el modelo. De este modo, el modelo puede ser una herramienta efectiva de validación de la teoría disponible: en primer lugar, el modelo formaliza las hipotéticas relaciones entre variables creando un modelo causal refutable con múltiples “puntos objeto de análisis”<sup>25</sup> (Bell y Senge, 1980); en segundo lugar, permite analizar y comprobar hasta que punto son coherentes y completas las interrelaciones propuestas en el modelo.

2. *Validación empírica de la teoría:* Si bien la teoría propuesta describe las relaciones entre variables, gran parte de la evidencia disponible en relación con esas relaciones esta fragmentada y es de carácter específico. De este modo y en cuanto al análisis de una teoría dinámica compleja, deben tenerse en cuenta tres aspectos fundamentales relacionados con la validación:

- ¿Se corresponde la microestructura del modelo con los conocimientos que se tienen sobre el sistema real?
- ¿Apoyan las relaciones observadas o estimadas intuitivamente la teoría disponible al respecto?
- ¿Puede el comportamiento macro del problema analizado ser explicado a partir de los componentes estructurales de la teoría?

Oliva (1996) afirma que los tres aspectos han de guiar una estrategia de validación basada en la medida o evaluación del modelo respecto a la estructura y comportamiento del sistema analizado. Dicha evaluación respecto a la evidencia empírica corrobora la capacidad del modelo de “capturar” o representar fielmente las características observables en la realidad y su potencial relevancia como instrumento para la gestión.

En definitiva este proceso de evaluación, cuya finalidad última es la consecución de una validación estructural, implica una combinación de un estudio de campo detallado, análisis de datos numéricos y desarrollo de un modelo formal.

*Derivación de implicaciones para la dirección:* Los resultados obtenidos del proceso de validación han de ser empleados con la finalidad de facilitar la detección de puntos de apalancamiento en el sistema, así como recomendaciones en cuanto a posibles políticas alternativas, extrapolando estos resultados a otros sistemas de similares características.

Con carácter general, son muchos los tests desarrollados con el fin de apoyar el diagnóstico de errores así como para asistir el proceso de incrementar la confianza en un modelo. La validación de un modelo no debe centrarse, por tanto, únicamente en la comparación entre las predicciones obtenidas de la simulación con el mismo y las observaciones del sistema real. Por el contrario, es conveniente el empleo de un amplio número de tests que configuran un “test generalizado” (Randers, 1980, p.127). La naturaleza de los modelos dinámicos permite el empleo de una gran variedad de tests de estructura y comportamiento que no es posible aplicar a otros tipos de modelos; por el contrario, algunos de los tests más extendidos, tales como los estadísticos, son o bien inapropiados o, como mucho, suplementarios para los modelos dinámicos (Forrester y Senge, 1980, p. 209). En este sentido, Sterman (1984) recoge y sintetiza, mediante la siguiente tabla, los principales tests apropiados para este tipo de modelos propuestos en la literatura al respecto, incluyendo en la misma tests relativos a la estructura, parámetros, comportamiento y recomendaciones acerca de políticas a aplicar obtenidas del modelo.

---

<sup>25</sup>Los autores hacen referencia a “points of testing”, es decir, puntos del modelo en los cuales es posible aplicar un test.



TEST DE LA ESTRUCTURA DEL MODELO	
Verificación de la estructura	¿Es la estructura del modelo consistente con el conocimiento descriptivo relevante del sistema?
Verificación de los parámetros	¿Son los parámetros consistentes con el conocimiento descriptivo (y numérico cuando estuviese disponible) relevante del sistema?
Condiciones extremas	¿Tienen sentido las ecuaciones incluso para valores extremos de los inputs?
Adecuación estructural de las fronteras del modelo	¿Son todos los conceptos importantes para el análisis del problema endógenos al modelo?
Consistencia dimensional	¿Son todas las ecuaciones del modelo dimensionalmente consistentes sin necesidad de utilizar parámetros sin significado real en términos del problema?
TEST DEL COMPORTAMIENTO DEL MODELO	
Reproducción del comportamiento	¿Genera el modelo los síntomas del problema, los patrones de comportamiento, cambios de fase, frecuencias y otras características del comportamiento real del sistema?
Comportamientos anómalos	¿Surgen comportamientos anómalos cuando se elimina alguna asunción fundamental del modelo?
Capacidad de generalización	¿Puede el modelo reproducir el comportamiento de ejemplos de sistemas similares cambiando adecuadamente los parámetros del mismo?
Comportamientos sorprendentes	¿Proporciona el modelo comportamientos sorprendentes no conocidos en el sistema real?
Políticas extremas	¿Tiene el modelo comportamientos adecuados cuando se le somete a políticas o inputs extremos?
Adecuación del comportamiento a las fronteras del modelo	¿Es el comportamiento del modelo sensible a la adición o alteración de su estructura para representar teorías alternativas plausibles?
Sensibilidad del comportamiento	¿Es el modelo sensible a variaciones plausibles de los parámetros?
Comportamiento estadístico	¿Tiene el comportamiento del modelo las mismas características estadísticas que el comportamiento del sistema real?
TEST DE LAS IMPLICACIONES DE LAS POLÍTICAS	
Mejoras del sistema	¿Resulta mejorado el comportamiento del sistema real mediante la utilización del modelo?
Predicción del comportamiento	¿Describe el modelo adecuadamente los resultados de una nueva política?
Adecuación de las fronteras del modelo a las políticas formuladas	¿Son las políticas propuestas sensibles a la adición o alteración de su estructura para representar teorías alternativas plausibles?
Sensibilidad de las políticas	¿Son las políticas propuestas sensibles a variaciones plausibles de los parámetros?

Figura 7.2: Tests para la evaluación de modelos dinámicos

Fuente: Sterman, D. J. (1984, p. 52)<sup>26</sup>

### 7.1. Tests de la estructura del modelo

- *Tests de verificación de la estructura del modelo:* Consiste en comparar la estructura del modelo con la estructura del sistema real que el modelo representa; así, la estructura del modelo no debe contradecir el conocimiento disponible acerca de la estructura real. Por lo tanto, este test ha de incluir una revisión de las presunciones del modelo por parte de aquellos individuos que posean elevado conocimiento y vinculación con del sistema real. Asimismo, deberá incluir una comparación de las presunciones del modelo con las descripciones sobre la toma de decisiones y relaciones organizativas que se halla en la literatura relevante. Este test es uno de los más sencillos de realizar, de modo que muchas estructuras superan el test de verificación de estructura.
- *Test de verificación de parámetros:* Los parámetros o constantes del modelo pueden ser verificados mediante verificación con observaciones de la realidad al igual que la

<sup>26</sup> Adaptado a su vez de Forrester y Senge (1980, p.227) y Richardson y Pugh (1981, pp. 313-19).

estructura puede ser comparada con el conocimiento disponible al respecto. En este caso, la verificación de parámetros implica comparar los parámetros del modelo con el conocimiento disponible sobre el sistema real con el fin de determinar si los anteriores se corresponden conceptual y numéricamente con la realidad observada<sup>27</sup>.

- *Test de condiciones extremas:* Una parte importante del conocimiento sobre los sistemas reales se obtiene de las consecuencias surgidas de condiciones extremas a que se puedan enfrentar. La incorporación del conocimiento obtenido tras someter al sistema a situaciones extremas supone siempre una mejora del modelo operando en condiciones normales. De este modo, la estructura de todo modelo debería permitir combinaciones extremas de niveles del sistema, cuestionándose su solidez en caso de no superar este test. En este sentido, un argumento en contra del sometimiento de un modelo a esta prueba afirma que las condiciones extremas no se producen en la realidad, tampoco deberían reproducirse mediante la simulación con el modelo. Sin embargo, las no-linealidades surgidas al acercar el sistema a condiciones extremas pueden tener importantes repercusiones para el ámbito normal de operatividad del sistema.

Este test se efectúa examinando cada tasa o ratio del modelo, es decir, aquellas variables que representan las decisiones adoptadas en el sistema, y relacionándolo, a través de cualquier variable auxiliar, con el nivel del cual depende la tasa. A continuación será necesario comprobar las implicaciones de otorgar cada nivel valores máximos y mínimos y posibles combinaciones entre ellos, con el fin de determinar la aceptabilidad de la ecuación tasa resultante.

Dos son los motivos que justifican la efectividad del test de condiciones extremas: en primer lugar, es muy apropiado para detectar posibles fallos en la estructura del modelo, de modo que el sometimiento a una condición extrema puede poner de manifiesto errores importantes de planteamiento. Un segundo motivo que justifica la aplicación de este test es que, al forzar al sistema a operar fuera de su "región" o límites históricos de evolución, se incrementa la utilidad potencial del modelo, favoreciendo la puesta en práctica de nuevas políticas que desplacen el comportamiento del sistema más allá de sus límites de comportamiento habituales<sup>28</sup>.

- *Test de adecuación estructural de las fronteras del modelo:* Este test se plantea en que medida el grado de agregación del modelo es apropiado, así como si el modelo incluye o recoge todos los aspectos relevantes de la estructura del sistema que representa. Puesto que todo modelo se orienta al análisis y posible tratamiento o resolución de un determinado problema, es este último el que ha de guiar el establecimiento de las fronteras del modelo. Es decir, el modelo no precisa recoger aquellos aspectos del sistema cuya incorporación al mismo no añadan o aporten conocimientos imprescindibles; en definitiva, aquellos elementos que, en caso de ser incorporados al modelo tengan escaso impacto en el comportamiento básico o no afecten a las posibles recomendaciones extraídas del modelo que los excluya.

Un aspecto clave en este sentido es, por tanto, el conocimiento profundo del propósito del modelo, puesto que su ignorancia u omisión puede conducir a la incorporación de elementos del sistema innecesarios para la consecución del fin último del modelo y cuya única contribución al mismo será un aumento de su complejidad.

---

<sup>27</sup>La verificación de parámetros y de la estructura están interrelacionadas, puesto que ambas parten del mismo objetivo

<sup>28</sup>Forrester y Senge (1980) afirman que un modelo que únicamente demuestra un comportamiento plausible en condiciones normales, sólo podrá ser empleado para analizar políticas que no fuercen al sistema a operar fuera de los límites habituales.

- *Test de consistencia dimensional*: Este test implica un análisis dimensional de las tasas o ratios incluidos en el modelo, comprobando de este modo que, todas y cada una de las variables que lo conforman, aparecen expresadas en las unidades de medida adecuadas. Una vía inadecuada, si bien empleada con relativa asiduidad es la incorporación de parámetros innecesarios con escaso o ningún significado más allá que el de lograr la adecuación dimensional de las ecuaciones en que se emplean.

## 7.2. Tests del comportamiento del modelo

- *Test de reproducción del comportamiento*: Este test tiene como objetivo comprobar que el modelo recrea o genera aspectos tales como los síntomas del problema que dan lugar a la elaboración del modelo, las periodicidades en las fluctuaciones y relaciones de fase entre variables, así como otras características inherentes al comportamiento del sistema real.
- *Test de predicción del comportamiento*<sup>29</sup>: Si bien es cierto que se afirma que la dinámica de sistemas no persigue como objetivo último la predicción de los valores a adoptar por el sistema en el futuro (Forrester, 1961, pp. 123-8), sin embargo, todo modelo debería ser capaz de adelantar o prever, en cierta medida, ese comportamiento futuro. En este sentido, todo modelo dinámico puede ser sometido a tests de medición de su capacidad predictiva, denominados *test de predicción de patrones* y *test de predicción de eventos*. El primero de ellos analiza en que medida el modelo es capaz de generar patrones de comportamiento futuro cualitativamente correctos, mientras que el segundo se centra en medir la capacidad del modelo de identificar las condiciones que originan un determinado evento, independientemente del momento en que se pueda producir.
- *Test de comportamientos anómalos*: Este test es inherente a la realización de un *modelo* dinámico, en la medida en que a la par construye y simula el modelo, surgen comportamientos anómalos respecto a los del sistema real. Una vez detectado dicho comportamiento, así como el elemento del modelo que lo origina, normalmente es posible encontrar el origen en alguna de las hipótesis o supuestos de partida del modelo. De este modo, una vez eliminado el elemento causante o modificada la hipótesis que origina el mismo, la anomalía desaparece.
- *Test de capacidad de generalización*: Con carácter general, todo modelo dinámico representa una “familia” de sistemas sociales, es decir, se trata de un *modelo* general que representa a una clase de sistema<sup>30</sup>. El modelo, en definitiva, ha de ser una teoría general y su estructura, la estructura de la totalidad del conjunto que representa. Las circunstancias especiales para cada caso han de aparecer recogidas en los parámetros, de modo que modificando estos últimos, el modelo pueda ser empleado para representar el comportamiento de un miembro determinado de la “familia”.
- *Test de comportamientos sorprendentes*: En la medida en que el modelo genere *comportamientos* inesperados, en primer lugar es necesario identificar las causas que lo generan y a continuación comparar dichas causas y el comportamiento con sus

---

<sup>29</sup>El test de predicción del comportamiento no aparece recogido en la tabla propuesta por Sterman (1984) puesto que Forrester y Senge (1980, p. 218) lo consideran análogo al test de reproducción del comportamiento, con la única diferencia de que este último centra su atención en el comportamiento pasado del sistema, mientras que el primero la centra en el comportamiento futuro del mismo.

<sup>30</sup>Por “clase” se hace referencia a un conjunto de sistemas con características similares que, si bien difieren en aspectos puntuales, poseen una estructura y rasgos básicos comunes. El objetivo, por tanto, de un modelo es reflejar esas características compartidas por todos los sistemas de una misma clase, de modo que permita obtener conclusiones generales válidas para todos ellos, pudiendo adaptarse a los casos concretos mediante modificaciones mínimas.

homónimos en el sistema real. En la medida en que este procedimiento favorezca la identificación de comportamientos del sistema real no reconocidos o ignorados previamente, en ese caso, este test contribuye a potenciar la confianza en la utilidad del modelo.

- *Test de políticas extremas:* Esta prueba consiste en alterar, de forma extrema, *alguna* de las políticas, recogidas en el modelo a través de los ratios o tasas, con el fin de analizar las consecuencias dinámicas de dicho cambio. El objetivo que se persigue en este caso es verificar el grado de resistencia o elasticidad del modelo ante cambios significativos en las políticas, comprobando asimismo si los comportamientos surgidos en esas situaciones son adecuados.
- *Test de adecuación del comportamiento a las fronteras del sistema:* Este test se emplea para determinar si el modelo incluye la estructura necesaria para analizar aquellos aspectos cuyo estudio constituye el objetivo de la elaboración del modelo. Incluye, por tanto, la conceptualización de la estructura adicional que podría influir en el comportamiento del modelo, comparando a continuación este último con y sin esa estructura adicional. De este modo, puede ponerse en evidencia la necesidad de eliminar elementos en principio considerados endógenos pero que no son necesarios para la generación del comportamiento que se desea analizar.
- *Test de sensibilidad del modelo:* Centra su atención en la sensibilidad del modelo ante cambios en el valor de los parámetros. A continuación se comprueba si estos cambios impiden al modelo superar el resto de tests a que previamente se había sometido. En caso de que esto no suceda, se incrementa la confianza en el modelo.
- *Test de comportamiento estadístico:* Persiguen comparar si el comportamiento del modelo presenta las mismas características estadísticas que el comportamiento del sistema real. Si bien los tests estadísticos convencionales pretenden comparar la estructura del modelo directamente a los datos empíricos disponibles, en este caso se trata de comparar el comportamiento del modelo en relación con los datos.

### **7.3. Tests de las implicaciones de las políticas**

- *Test de mejoras del sistema:* Pretende contrastar si las políticas propuestas y consideradas adecuadas a partir de la simulación con el modelo, mejoran asimismo el comportamiento del sistema real. Sin embargo, la aplicación de este test presenta un importante inconveniente en la medida en que únicamente se pondrán en práctica las políticas propuestas a partir del modelo en la medida en que se tenga un elevado nivel de confianza en el modelo. Además, la reacción muy a largo plazo observada en los sistemas sociales ante cambios en sus políticas implica que los resultados del test de mejora de las políticas se acumulen lentamente a lo largo del tiempo, dificultando de este modo la detección de la relación causa-efecto.
- *Test de predicción de cambio en el comportamiento:* El objetivo último de esta prueba es comprobar si el modelo predice correctamente el modo en que el comportamiento del sistema va a cambiar en la medida en que se modifiquen las políticas aplicadas. Para su puesta en práctica pueden aplicarse diversas técnicas: en primer lugar, el test se puede llevar a cabo efectuando cambios en las políticas en el modelo y verificando la factibilidad de los cambios de comportamiento resultantes. Asimismo, puede examinarse la respuesta del modelo ante políticas que ya han sido aplicadas en el sistema real con el fin de comprobar si el primero reacciona de manera similar a la respuesta observada en el sistema real. Por último, en el caso de que el modelo represente a una familia de sistemas, las políticas del modelo general podrán ser alteradas para así comprobar si su comportamiento coincide o se asemeja a los observados en los distintos miembros de la "familia".

- *Test de adecuación de las fronteras del modelo a las políticas formuladas:* A diferencia de los tests de adecuación de las fronteras del modelo referentes a la estructura o al comportamiento del modelo, este test examina en qué medida la alteración de las fronteras del modelo podría modificar las recomendaciones, en cuanto a la política a aplicar, obtenidas tras la simulación con el anterior. Se pretende en definitiva contrastar si las políticas propuestas en principio son sensibles a la adición o alteración de su estructura y si, por tanto, es necesario alterar o no la primitiva recomendación.
- *Test de sensibilidad de las políticas:* Permite determinar en qué medida las recomendaciones en cuanto a políticas a aplicar deberían estar influenciadas por la incertidumbre en cuanto a los valores de los parámetros. De esta forma puede ayudar a poner de manifiesto el riesgo relacionado con la adopción de un modelo para la toma de decisiones. Si se mantienen las recomendaciones en cuanto a las políticas, independientemente de los valores de los parámetros dentro de un rango adecuado, se reducirá el riesgo de empleo del modelo.

#### 7.4. El papel de los tests de significación estadística

Tal y como señala Barlas (1996, pp. 196-9)<sup>31</sup>, el papel desempeñado por los tests de significación estadística en el proceso de validación de un modelo es muy controvertido. En general, los tests de significación estadística consisten en plantear una hipótesis nula y luego rechazarla si la discrepancia entre la predicción de la hipótesis y los datos reales es estadísticamente significativa. Ello supone asumir un nivel fijo de discrepancia por encima del cual la hipótesis será rechazada y que, en definitiva, implica la admisión de una cierta probabilidad de error. El test de significación estadística es usado a la hora de validar modelos en las ciencias sociales y económicas, sin embargo, tiene escasa aplicación en dinámica de sistemas<sup>32</sup>. Su escaso empleo, en este caso, se justifica por los problemas de tipo técnico y filosóficos que conllevan.

*Motivos técnicos:* Las razones técnicas por las que la significación estadística tiene escasa relevancia en la validación de modelos están relacionadas con algunas presunciones o supuestos fundamentales que han de mantenerse o cumplirse para que los tests estadísticos sean válidos. La mayoría de los tests estadísticos asumen al menos que los datos son: no autocorrelacionados, sin correlación cruzada y de distribución normal. Puede afirmarse que las dos primeras presunciones casi nunca se cumplen en un modelo de dinámica de sistemas. Los datos generados por un modelo dinámico presentan autocorrelación y correlación cruzada por su naturaleza. Aplicar tests estadísticos a datos correlacionados requiere una simplificación extensa del modelo y/o una transformación de los datos, que puede producir una solución completamente insatisfactoria (Mass y Senge, 1980; Sterman, 1984; Barlas, 1985). Otra posible dificultad técnica que puede incrementar la ambigüedad de los tests estadísticos es la existencia de errores de medida en relación con los datos, hecho muy común en estudios socioeconómicos. Por último, en los modelos dinámicos no existe una única variable output del mismo en la cual se pueda centrar el test de validación, puesto que normalmente existen gran cantidad de variables de relativa importancia para el propósito del estudio.

*Motivos filosóficos:* En este caso se hace referencia a problemas relacionados con la práctica habitual de fijar arbitrariamente el nivel de significación (normalmente en un 0.05), el cual determina o define la "región de rechazo" del test. Un segundo tipo de decisión

---

<sup>31</sup>La argumentación que se expone a continuación con relación al empleo de los tests de significación estadística para la validación de modelos dinámicos se obtiene, prácticamente en su totalidad, de *Formal Aspects of Model Validity and Validation in System Dynamics* (Barlas, 1996), puesto que el autor recoge en este artículo las aportaciones más significativas en cuanto al empleo de tests estadísticos en la validación.

<sup>32</sup>Como se ha expuesto anteriormente, este es uno de los aspectos que más críticas suscita la dinámica de sistemas como metodología para el análisis de sistemas sociales y económicos.

errónea se desprende de la probabilidad de aceptar una hipótesis nula que es en realidad falsa (error tipo II<sup>33</sup>). Ambos problemas están relacionados, puesto que la fijación de un nivel de significación muy pequeño implicaría permitir un número relativamente elevado de errores tipo II, mientras que un nivel de significación relativamente alto significaría una probabilidad reducida del error tipo II. Cada tipo de error originaría unos costes, de modo que, si se conocieran esos costes, el enfoque adecuado sería buscar el nivel de significación “óptimo” que minimice el coste total esperado resultante de cometer errores de tipo I y II. Esta solución que se acaba de proponer no es adecuada para la validación de modelos dinámicos puesto que estos costes derivados de los dos tipos de error son muy difíciles de estimar e incluso de definir.

En definitiva, el empleo de tests estadísticos supone que la fijación arbitraria de un nivel de significación a priori y el empleo de límite numérico para rechazar o no rechazar el modelo constituye un método “objetivo y científico” de validación. La alternativa sería presentar los estadísticos obtenidos, pero sin establecer un test de significación, es decir, sin rechazar o dejar de rechazar decisiones (Barlas, 1996, p. 197). Esta última alternativa de empleo de los tests estadísticos supone alejarse del enfoque del positivismo lógico<sup>34</sup> y adoptar el enfoque relativista/holístico, que argumentaría que en la medida en que la validez del modelo depende del propósito del mismo, el grado de significación debe ser también “dependiente del contexto”. En último término, el modelo debe ser aceptado como válido si el usuario o aquel que lo elaboró considera más beneficioso su empleo que su no empleo.

Por último, un problema conceptual fundamental relacionado con la aplicación de la significación estadística en la validación de modelos está relacionado con la propia naturaleza de estos tests. En estos últimos, la hipótesis nula presenta, con carácter general, la siguiente forma:  $X_m = X_r$ , siendo  $X_m$  alguna medida del modelo y  $X_r$  la misma medida en el sistema real. El problema que se plantea, por tanto, es que este tipo de test estadístico es de alguna utilidad únicamente cuando la decisión final consiste en rechazar la hipótesis nula, que sería en este caso “el modelo no es válido”. Si, por el contrario, no es posible rechazar la hipótesis nula, siendo éste el objetivo último de la validación, el resultado sería extremadamente débil<sup>35</sup>. Este es el motivo por el cual en los tests estadísticos habituales, la hipótesis que se pretende establecer se sitúa normalmente como “hipótesis alternativa”<sup>36</sup>. Barlas afirma que esta idea no puede ser aplicada al caso de la validación de un modelo dinámico, donde se pretende demostrar que no existen diferencias significativas entre el modelo y el sistema real.

## 8. Conclusiones

En este trabajo se presenta la dinámica de sistemas como una metodología de gran utilidad para el análisis de problemas complejos. Si bien en sus orígenes se centran únicamente en el ámbito industrial, posteriormente se ha extendido su aplicabilidad al análisis de gran diversidad de sistemas. Como principales fundamentos de esta metodología, caben destacar la existencia de bucles de realimentación entre variables, la importancia de los retrasos, tanto materiales como de información y, finalmente la existencia de relaciones no lineales entre variables. Asimismo, resulta de especial interés la constatación de que

---

<sup>33</sup>Frente al error tipo II, el error tipo I consiste en la probabilidad de rechazar una hipótesis verdadera.

<sup>34</sup>El positivismo lógico implica un tipo de decisión binaria: rechazar o no rechazar, es decir, asumen que el modelo es verdadero o falso.

<sup>35</sup>Se afirma que el resultado sería débil porque, dado que la validación se obtendría por la imposibilidad de rechazar el modelo y no positivamente, por su utilidad real.

<sup>36</sup>Barlas establece como ejemplo que si se pretende demostrar que un determinado tratamiento es adecuado para mejorar un determinado proceso, en ese caso la hipótesis nula sería “el tratamiento no afecta al proceso”, de modo que si al fin la hipótesis nula es rechazada, entonces la hipótesis alternativa sería considerada válida.

existen una serie de estructuras elementales que subyacen y son comunes a muchos sistemas –los bucles positivos, negativos y combinaciones de éstos, conformando los denominados arquetipos sistémicos.

La elaboración de un modelo de simulación empleando esta metodología implica el seguimiento de una serie de fases o pasos, descritos en el apartado 5 de este trabajo. En este sentido, es necesario señalar la importancia de la participación de los potenciales usuarios del modelo y de aquellas personas directamente relacionadas con el sistema cuyo comportamiento se desea modelizar. De entre todas las fases a seguir, se presta especial atención a la validación del modelo –por tratarse de uno de los aspectos más controvertidos de esta metodología–, describiendo detalladamente los distintos tests a que el modelo puede ser sometido con el fin de garantizar su capacidad de representar el comportamiento del sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

- ARACIL, J. (1986): *Introducción a la Dinámica de Sistemas*. Alianza Universidad Textos, Madrid.
- BARLAS, Y. (1989): «Multiple Tests for Validation of System Dynamics Type of Simulation Models». *European Journal of Operational Research*, vol. 42, pp. 59-87.
- BARLAS, Y. (1996): «Formal Aspects of Model Validity and Validation in System Dynamics». *System Dynamics Review*, vol. 12, n° 3, pp. 183-210.
- BELL, J. A. y BELL J. F. (1980): «System Dynamics Modelling and Scientific Method». In J. Randers, *Elements of System Dynamics Method*. Cambridge, MA: MIT Press.
- BELL, J. A. y SENGE, P. M. (1980): «Methods for Enhancing Refutability in System Dynamics Modeling». *TIMS Studies in the Management Sciences*, 14 (1) pp. 61-73.
- FORRESTER, J. W. (1961): *Industrial Dynamics*. The MIT PRESS, Institute of Technology, Cambridge Massachussets.
- FORRESTER, J. W. (1968a): «Market Growth as influenced by Capital Investment». *Industrial Management Review*, 9, pp. 83-105.
- FORRESTER, J. W. (1968b): «Industrial Dynamics: After de First Decade». *Management Science*, 14 (7), pp. 399-415.
- FORRESTER, J. W. (1968c): «Industrial Dynamics: A Response to Ansoff and Slevin». *Management Science*, 14 (7), pp. 601-618.
- FORRESTER, J. W. (1968d): *Principles of Systems*. Wright-Allen Press, Inc., Cambridge Massachussets, MIT Press
- FORRESTER, J. W. (1969): *Urban Dynamics*, Cambridge Massachussets, MIT Press.
- FORRESTER, J. W. (1971a): *World Dynamics*, Cambridge Massachussets, MIT Press.
- FORRESTER, J. W. (1971b): «Counterintuitive Behavior of Social Systems». *Technology Review*, 73, pp. 52-68.
- FORRESTER, J. W. (1987): «Nonlinearity in High Order Models of Social Systems». *European Journal of Operations Research*, 30, pp. 104-109.
- FORRESTER, J. W. (1992): «Policies, Decisions and Information Sources for Modeling». *European Journal of Operational Research*, 59, pp. 42-63.
- FORRESTER, J. W. (1994): «System Dynamics, Systems Thinking, and Soft OR». *System Dynamics Review*, 10 (2-3), pp. 245-256.
- FORRESTER, J. K. y SENGE, P. (1980): «Tests for Building Confidence in System Dynamics Models». *System Dynamics*. A. Legasto, Jr., J. Forrester, J. Lyneis (eds.). Amsterdam, North-Holland.
- HAMILTON, M. S. (1980): «Estimating Lenghts and Orders of Delays in System Dynamics Models», *Elements of the System Dynamics Method*, part. IV, pp. 162-183.
- HANNON, B. y RUTH M. (1994): *Dynamic Modeling*. Springer-Verlag, New York.
- LYNEIS, J. M. (1980): *Corporate Planning and Policy Design: A System Dynamics Approach*. The MIT Press, Institute of Technology, Cambridge Massachussets.
- MASS, N. J. y SENGE, P. M. (1980): «Alternative Tests for Selecting Model Variables», *Elements of the System Dynamics Method*, part. V, pp. 203-223.
- NAYLOR, T. H. y FINGER, J. M. (1967): «Verification of Computer Simulation Models», *Management Science*, vol. 14, n°2, pp. 92-101.

- OLIVA, R. (1996): **A Dynamic Theory of Service Delivery: Implications for Managing Service Quality**. Ph. D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology.
- OLIVA, R. (1996): «Empirical Validation of a Dynamic Hypothesis», **System Dynamics 96**, System Dynamic Society, Richardson, G. P. Y Sterman, J. D. ed., vol. 2, pp. 405-408.
- OLIVA, R. (1997): «A VENSIM Module to Calculate Summary Statistics for Historical Fit», **D-4584**, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.
- PETERSON, D. W. (1980): «Statistical Tools for System Dynamics», **Elements of the System Dynamics Method**, part. V, pp. 224-246.
- RANDERS, J. (1980): «Guidelines for Model Conceptualization», **Elements of the System Dynamics Method**, part. III, pp. 117-139.
- RICHARDSON, G. P. (1986): «Problems with Causal-loops Diagrams», **System Dynamics Review**, vol. 2, n° 2, pp. 158-170.
- RICHARDSON, G. P. (1991): **Feedback Thought in Social Science and Systems Theory**. Philadelphia: University of Pennsylvania Press.
- RICHARDSON, G. P. (1996): «Problems for the Future of System Dynamics», **System Dynamics Review**, vol. 12, n° 2, pp. 141-57.
- RICHARDSON, G. P. y PUGH, A. L. (1981): **Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO**. The Massachusetts Institute of Technology.
- SENGE, P. M. (1992): **La Quinta Disciplina**. Ediciones Juan Granica, Barcelona.
- SENGE, P. M. (1995): **La Quinta Disciplina en la Práctica**. Ediciones Granica, Barcelona.
- SHANNON, R. E. (1975): **System Simulation (The Art and Science)**. Prentice-Hall, Inc. New Jersey.
- SHRECKENGOST, R. C. (1985): **Self-Report Methods of Estimating Drug Use: Meeting Current Challenges to Validity**. Rouse, B. A., Kozel, N. J. y Richards, L. G. Editors, Division of Epidemiology and Statistical Analysis, Maryland.
- SIMON, H. A. (1969): **Las ciencias de lo artificial**. Editorial ATE, Barcelona.
- SIMON, H. A. (1979): «Rational Decision Making in Business Organizations», **The American Economic Review**, vol. 69, n° 4, pp. 493-513.
- SIMON, H. A. (1982): **Models of Bounded Rationality**. Cambridge, MA: MIT Press.
- STERMAN, J. D. (1984): «Appropriate Summary Statistics for Evaluating the Historic Fit of the System Dynamics Models», **Dynamica**, vol. 10, pt. II..
- STERMAN, J. D. (1987): «Testing Behavioral Simulation Models by Direct Experiment», **Management Science**, vol. 33, n° 12, pp. 1572-92.
- VENNIX, J. A. M. y GUBBELS, J. W. (1992): «Knowledge Elicitation in Conceptual Model Building: A Case Study in Modeling a Regional Dutch Health Care System», **European Journal of Operational Research**, 59, pp. 85-101.
- WOLSTENHOLME, E. F. (1992): «The Definition and Application of a Stepwise Approach to Model Conceptualisation and Analysis», **European Journal of Operational Research**, 59, pp. 123-136.



**FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES**  
**RELACIÓN DE DOCUMENTOS DE TRABAJO:**

- Doc. 001/88 **JUAN A. VAZQUEZ GARCIA.**- Las intervenciones estatales en la minería del carbón.
- Doc. 002/88 **CARLOS MONASTERIO ESCUDERO.**- Una valoración crítica del nuevo sistema de financiación autonómica.
- Doc. 003/88 **ANA ISABEL FERNANDEZ ALVAREZ; RAFAEL GARCIA RODRIGUEZ; JUAN VENTURA VICTORIA.**- Análisis del crecimiento sostenible por los distintos sectores empresariales.
- Doc. 004/88 **JAVIER SUAREZ PANDIELLO.**- Una propuesta para la integración multijurisdiccional.
- Doc. 005/89 **LUIS JULIO TASCON FERNANDEZ; JOSE MANUEL DIEZ MODINO.**- La modernización del sector agrario en la provincia de León.
- Doc. 006/89 **JOSE MANUEL PRADO LORENZO.**- El principio de gestión continuada: Evolución e implicaciones.
- Doc. 007/89 **JAVIER SUAREZ PANDIELLO.**- El gasto público del Ayuntamiento de Oviedo (1982-88).
- Doc. 008/89 **FELIX LOBO ALEU.**- El gasto público en productos industriales para la salud.
- Doc. 009/89 **FELIX LOBO ALEU.**- La evolución de las patentes sobre medicamentos en los países desarrollados.
- Doc. 010/90 **RODOLFO VAZQUEZ CASIELLES.**- Investigación de las preferencias del consumidor mediante análisis de conjunto.
- Doc. 011/90 **ANTONIO APARICIO PEREZ.**- Infracciones y sanciones en materia tributaria.
- Doc. 012/90 **MONTSERRAT DIAZ FERNANDEZ; CONCEPCION GONZALEZ VEIGA.**- Una aproximación metodológica al estudio de las matemáticas aplicadas a la economía.
- Doc. 013/90 **EQUIPO MECO.**- Medidas de desigualdad: un estudio analítico
- Doc. 014/90 **JAVIER SUAREZ PANDIELLO.**- Una estimación de las necesidades de gastos para los municipios de menor dimensión.
- Doc. 015/90 **ANTONIO MARTINEZ ARIAS.**- Auditoría de la información financiera.
- Doc. 016/90 **MONTSERRAT DIAZ FERNANDEZ.**- La población como variable endógena
- Doc. 017/90 **JAVIER SUAREZ PANDIELLO.**- La redistribución local en los países de nuestro entorno.
- Doc. 018/90 **RODOLFO GUTIERREZ PALACIOS; JOSE MARIA GARCIA BLANCO.**- "Los aspectos invisibles" del declive económico: el caso de Asturias.
- Doc. 019/90 **RODOLFO VAZQUEZ CASIELLES; JUAN TRESPALACIOS GUTIERREZ.**- La política de precios en los establecimientos detallistas.
- Doc. 020/90 **CANDIDO PAÑEDA FERNANDEZ.**- La demarcación de la economía (seguida de un apéndice sobre su relación con la Estructura Económica).
- Doc. 021/90 **JOAQUIN LORENCES.**- Margen precio-coste variable medio y poder de monopolio.
- Doc. 022/90 **MANUEL LAFUENTE ROBLEDO; ISIDRO SANCHEZ ALVAREZ.**- El T.A.E. de las operaciones bancarias.
- Doc. 023/90 **ISIDRO SANCHEZ ALVAREZ.**- Amortización y coste de préstamos con hojas de cálculo.

- Doc. 024/90 **LUIS JULIO TASCON FERNANDEZ; JEAN-MARC BUIGUES.**- Un ejemplo de política municipal: precios y salarios en la ciudad de León (1613-1813).
- Doc. 025/90 **MYRIAM GARCIA OLALLA.**- Utilidad de la teorías de las opciones para la administración financiera de la empresa.
- Doc. 026/91 **JOAQUIN GARCIA MURCIA.**- Novedades de la legislación laboral (octubre 1990 - enero 1991)
- Doc. 027/91 **CANDIDO PAÑEDA.**- Agricultura familiar y mantenimiento del empleo: el caso de Asturias.
- Doc. 028/91 **PILAR SAENZ DE JUBERA.**- La fiscalidad de planes y fondos de pensiones.
- Doc. 029/91 **ESTEBAN FERNANDEZ SANCHEZ.**- La cooperación empresarial: concepto y tipología (\*)
- Doc. 030/91 **JOAQUIN LORENCES.**- Características de la población parada en el mercado de trabajo asturiano.
- Doc. 031/91 **JOAQUIN LORENCES.**- Características de la población activa en Asturias.
- Doc. 032/91 **CARMEN BENAVIDES GONZALEZ.**- Política económica regional
- Doc. 033/91 **BENITO ARRUÑADA SANCHEZ.**- La conversión coactiva de acciones comunes en acciones sin voto para lograr el control de las sociedades anónimas: De cómo la ingenuidad legal prefigura el fraude.
- Doc. 034/91 **BENITO ARRUÑADA SANCHEZ.**- Restricciones institucionales y posibilidades estratégicas.
- Doc. 035/91 **NURIA BOSCH; JAVIER SUAREZ PANDIELLO.**- Seven Hypotheses About Public Chjoice and Local Spending. (A test for Spanish municipalities).
- Doc. 036/91 **CARMEN FERNANDEZ CUERVO; LUIS JULIO TASCON FERNANDEZ.**- De una olvidada revisión crítica sobre algunas fuentes histórico-económicas: las ordenanzas de la gobernación de la cabecera.
- Doc. 037/91 **ANA JESUS LOPEZ; RIGOBERTO PEREZ SUAREZ.**- Indicadores de desigualdad y pobreza. Nuevas alternativas.
- Doc. 038/91 **JUAN A. VAZQUEZ GARCIA; MANUEL HERNANDEZ MUÑIZ.**- La industria asturiana: ¿Podemos pasar la página del declive?.
- Doc. 039/92 **INES RUBIN FERNANDEZ.**- La Contabilidad de la Empresa y la Contabilidad Nacional.
- Doc. 040/92 **ESTEBAN GARCIA CANAL.**- La Cooperación interempresarial en España: Características de los acuerdos de cooperación suscritos entre 1986 y 1989.
- Doc. 041/92 **ESTEBAN GARCIA CANAL.**- Tendencias empíricas en la conclusión de acuerdos de cooperación.
- Doc. 042/92 **JOAQUIN GARCIA MURCIA.**- Novedades en la Legislación Laboral.
- Doc. 043/92 **RODOLFO VAZQUEZ CASIELLES.**- El comportamiento del consumidor y la estrategia de distribución comercial: Una aplicación empírica al mercado de Asturias.
- Doc. 044/92 **CAMILO JOSE VAZQUEZ ORDAS.**- Un marco teórico para el estudio de las fusiones empresariales.
- Doc. 045/92 **CAMILO JOSE VAZQUEZ ORDAS.**- Creación de valor en las fusiones empresariales a través de un mayor poder de mercado.
- Doc. 046/92 **ISIDRO SANCHEZ ALVAREZ.**- Influencia relativa de la evolución demográfica en le futuro aumento del gasto en pensiones de jubilación.
- Doc. 047/92 **ISIDRO SANCHEZ ALVAREZ.**- Aspectos demográficos del sistema de pensiones de jubilación español.

- Doc. 048/92 SUSANA LOPEZ ARES.- Marketing telefónico: concepto y aplicaciones.
- Doc. 049/92 CESAR RODRIGUEZ GUTIERREZ.- Las influencias familiares en el desempleo juvenil.
- Doc. 050/92 CESAR RODRIGUEZ GUTIERREZ.- La adquisición de capital humano: un modelo teórico y su contrastación.
- Doc. 051/92 MARTA IBÁÑEZ PASCUAL.- El origen social y la inserción laboral.
- Doc. 052/92 JUAN TRESPALACIOS GUTIERREZ.- Estudio del sector comercial en la ciudad de Oviedo.
- Doc. 053/92 JULITA GARCIA DIEZ.- Auditoría de cuentas: su regulación en la CEE y en España. Una evidencia de su importancia.
- Doc. 054/92 SUSANA MENENDEZ REQUEJO.- El riesgo de los sectores empresariales españoles: rendimiento requerido por los inversores.
- Doc. 055/92 CARMEN BENAVIDES GONZALEZ.- Una valoración económica de la obtención de productos derivados del petróleo a partir del carbón
- Doc. 056/92 IGNACIO ALFREDO RODRIGUEZ-DEL BOSQUE RODRIGUEZ.- Consecuencias sobre el consumidor de las actuaciones bancarias ante el nuevo entorno competitivo.
- Doc. 057/92 LAURA CABIEDES MIRAGAYA.- Relación entre la teoría del comercio internacional y los estudios de organización industrial.
- Doc. 058/92 JOSE LUIS GARCIA SUAREZ.- Los principios contables en un entorno de regulación.
- Doc. 059/92 M<sup>a</sup> JESUS RIO FERNANDEZ; RIGOBERTO PEREZ SUAREZ.- Cuantificación de la concentración industrial: un enfoque analítico.
- Doc. 060/94 M<sup>a</sup> JOSE FERNANDEZ ANTUÑA.- Regulación y política comunitaria en materia de transportes.
- Doc. 061/94 CESAR RODRIGUEZ GUTIERREZ.- Factores determinantes de la afiliación sindical en España.
- Doc. 062/94 VICTOR FERNANDEZ BLANCO.- Determinantes de la localización de las empresas industriales en España: nuevos resultados.
- Doc. 063/94 ESTEBAN GARCIA CANAL.- La crisis de la estructura multidivisional.
- Doc. 064/94 MONTSERRAT DIAZ FERNANDEZ; EMILIO COSTA REPARAZ.- Metodología de la investigación econométrica.
- Doc. 065/94 MONTSERRAT DIAZ FERNANDEZ; EMILIO COSTA REPARAZ.- Análisis Cualitativo de la fecundidad y participación femenina en el mercado de trabajo.
- Doc. 066/94 JOAQUIN GARCIA MURCIA.- La supervisión colectiva de los actos de contratación: la Ley 2/1991 de información a los representantes de los trabajadores.
- Doc. 067/94 JOSE LUIS GARCIA LAPRESTA; M<sup>a</sup> VICTORIA RODRIGUEZ URÍA.- Coherencia en preferencias difusas.
- Doc. 068/94 VICTOR FERNANDEZ; JOAQUIN LORENCES; CESAR RODRIGUEZ.- Diferencias interterritoriales de salarios y negociación colectiva en España.
- Doc. 069/94 M<sup>a</sup> DEL MAR ARENAS PARRA; M<sup>a</sup> VICTORIA RODRÍGUEZ URÍA.  
- Programación clásica y teoría del consumidor.

- Doc. 070/94 **M<sup>a</sup> DE LOS ÁNGELES MENÉNDEZ DE LA UZ; M<sup>a</sup> VICTORIA RODRÍGUEZ URÍA.**- Tantos efectivos en los empréstitos.
- Doc. 071/94 **AMELIA BILBAO TEROL; CONCEPCIÓN GONZÁLEZ VEIGA; M<sup>a</sup> VICTORIA RODRÍGUEZ URÍA.**- Matrices especiales. Aplicaciones económicas.
- Doc. 072/94 **RODOLFO GUTIÉRREZ.**- La representación sindical: Resultados electorales y actitudes hacia sindicatos.
- Doc. 073/94 **VÍCTOR FERNÁNDEZ BLANCO.**- Economías de aglomeración y localización de las empresas industriales en España.
- Doc. 074/94 **JOAQUÍN LORENCES RODRÍGUEZ; FLORENTINO FELGUEROSO FERNÁNDEZ.**- Salarios pactados en los convenios provinciales y salarios percibidos.
- Doc. 075/94 **ESTEBAN FERNÁNDEZ SÁNCHEZ; CAMILO JOSÉ VÁZQUEZ ORDÁS.**- La internacionalización de la empresa.
- Doc. 076/94 **SANTIAGO R. MARTÍNEZ ARGÜELLES.**- Análisis de los efectos regionales de la terciarización de ramas industriales a través de tablas input-output. El caso de la economía asturiana.
- Doc. 077/94 **VÍCTOR IGLESIAS ARGÜELLES.**- Tipos de variables y metodología a emplear en la identificación de los grupos estratégicos. Una aplicación empírica al sector detallista en Asturias.
- Doc. 078/94 **MARTA IBÁÑEZ PASCUAL; F. JAVIER MATO DÍAZ.**- La formación no reglada a examen. Hacia un perfil de sus usuarios.
- Doc. 079/94 **IGNACIO A. RODRÍGUEZ-DEL BOSQUE RODRÍGUEZ.**- Planificación y organización de la fuerza de ventas de la empresa.
- Doc. 080/94 **FRANCISCO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ.**- La reacción del precio de las acciones ante anuncios de cambios en los dividendos.
- Doc. 081/94 **SUSANA MENÉNDEZ REQUEJO.**- Relaciones de dependencia de las decisiones de inversión, financiación y dividendos.
- Doc. 082/95 **MONTSERRAT DÍAZ FERNÁNDEZ; EMILIO COSTA REPARAZ; M<sup>a</sup> del MAR LLORENTE MARRÓN.**- Una aproximación empírica al comportamiento de los precios de la vivienda en España.
- Doc. 083/95 **M<sup>a</sup> CONCEPCIÓN GONZÁLEZ VEIGA; M<sup>a</sup> VICTORIA RODRÍGUEZ URÍA.**- Matrices semipositivas y análisis interindustrial. Aplicaciones al estudio del modelo de Sraffa-Leontief.
- Doc. 084/95 **ESTEBAN GARCÍA CANAL.**- La forma contractual en las alianzas domésticas e internacionales.
- Doc. 085/95 **MARGARITA ARGÜELLES VÉLEZ; CARMEN BENAVIDES GONZÁLEZ.**- La incidencia de la política de la competencia comunitaria sobre la cohesión económica y social.
- Doc. 086/95 **VÍCTOR FERNÁNDEZ BLANCO.**- La demanda de cine en España. 1968-1992.
- Doc. 087/95 **JUAN PRIETO RODRÍGUEZ.**- Discriminación salarial de la mujer y movilidad laboral.
- Doc. 088/95 **M<sup>a</sup> CONCEPCIÓN GONZÁLEZ VEIGA.**- La teoría del caos. Nuevas perspectivas en la modelización económica.
- Doc. 089/95 **SUSANA LÓPEZ ARES.**- Simulación de fenómenos de espera de capacidad limitada con llegadas y número de servidores dependientes del tiempo con hoja de cálculo.
- Doc. 090/95 **JAVIER MATO DÍAZ.**- ¿Existe sobrecualificación en España?. Algunas variables explicativas.
- Doc. 091/95 **M<sup>a</sup> JOSÉ SANZO PÉREZ.**- Estrategia de distribución para productos y mercados industriales.
- Doc. 092/95 **JOSÉ BAÑOS PINO; VÍCTOR FERNÁNDEZ BLANCO.**- Demanda de cine en España: Un análisis de cointegración.

- Doc. 093/95 **M<sup>a</sup> LETICIA SANTOS VIJANDE.**- La política de marketing en las empresas de alta tecnología.
- Doc. 094/95 **RODOLFO VÁZQUEZ CASIELLES; IGNACIO RODRÍGUEZ-DEL BOSQUE; AGUSTÍN RUÍZ VEGA.**- Expectativas y percepciones del consumidor sobre la calidad del servicio. Grupos estratégicos y segmentos del mercado para la distribución comercial minorista.
- Doc. 095/95 **ANA ISABEL FERNÁNDEZ; SILVIA GÓMEZ ANSÓN.**- La adopción de acuerdos estatutarios antiadquisición.. Evidencia en el mercado de capitales español.
- Doc. 096/95 **ÓSCAR RODRÍGUEZ BUZNEGO.**- Partidos, electores y elecciones locales en Asturias. Un análisis del proceso electoral del 28 de Mayo.
- Doc. 097/95 **ANA M<sup>a</sup> DÍAZ MARTÍN.**- Calidad percibida de los servicios turísticos en el ámbito rural.
- Doc. 098/95 **MANUEL HERNÁNDEZ MUÑIZ; JAVIER MATO DÍAZ; JAVIER BLANCO GONZÁLEZ.**- Evaluating the impact of the European Regional Development Fund: methodology and results in Asturias (1989-1993).
- Doc. 099/96 **JUAN PRIETO; M<sup>a</sup> JOSÉ SUÁREZ.**- ¿De tal palo tal astilla?: Influencia de las características familiares sobre la ocupación.
- Doc. 100/96 **JULITA GARCÍA DÍEZ; RACHEL JUSSARA VIANNA.**- Estudio comparativo de los principios contables en Brasil y en España.
- Doc. 101/96 **FRANCISCO J. DE LA BALLINA BALLINA.**- Desarrollo de campañas de promoción de ventas.
- Doc. 102/96 **ÓSCAR RODRÍGUEZ BUZNEGO.**- Una explicación de la ausencia de la Democracia Cristiana en España.
- Doc. 103/96 **CÁNDIDO PAÑEDA FERNÁNDEZ.**- Estrategias para el desarrollo de Asturias.
- Doc. 104/96 **SARA M<sup>a</sup> ALONSO; BLANCA PÉREZ GLADISH; M<sup>a</sup> VICTORIA RODRÍGUEZ URÍA.**- Problemas de control óptimo con restricciones: Aplicaciones económicas.
- Doc. 105/96 **ANTONIO ÁLVAREZ PINILLA; MANUEL MENÉNDEZ MENÉNDEZ; RAFAEL ÁLVAREZ CUESTA.**- Eficiencia de las Cajas de Ahorro españolas. Resultados de una función de beneficio.
- Doc. 106/96 **FLORENTINO FELGUEROSO.**- Industrywide Collective Bargaining, Wages Gains and Black Labour Marketing Spain.
- Doc. 107/96 **JUAN VENTURA.**- La competencia gestionada en sanidad: Un enfoque contractual
- Doc. 108/96 **MARÍA VICTORIA RODRÍGUEZ URÍA; ELENA CONSUELO HERNÁNDEZ.**- Elección social. Teorema de Arrow.
- Doc. 109/96 **SANTIAGO ÁLVAREZ GARCÍA.**- Grupos de interés y corrupción política: La búsqueda de rentas en el sector público.
- Doc. 110/96 **ANA M<sup>a</sup> GUILLÉN.**- La política de previsión social española en el marco de la Unión Europea.
- Doc. 111/96 **VÍCTOR MANUEL GONZÁLEZ MÉNDEZ.**- La valoración por el mercado de capitales español de la financiación bancaria y de las emisiones de obligaciones.
- Doc. 112/96 **DRA. MARIA VICTORIA RODRIGUEZ URÍA; D. MIGUEL A. LÓPEZ FERNÁNDEZ; D<sup>ña</sup>. BLANCA M<sup>a</sup> PEREZ GLADISH.**- Aplicaciones económicas del Control Óptimo. El problema de la maximización de la utilidad individual del consumo. El problema del mantenimiento y momento de venta de una máquina.

- Doc. 113/96 OSCAR RODRÍGUEZ BUZNEGO.- Elecciones autonómicas, sistemas de partidos y Gobierno en Asturias.
- Doc. 114/96 RODOLFO VÁZQUEZ CASIELLES; ANA M<sup>a</sup> DÍAZ MARTÍN.- El conocimiento de las expectativas de los clientes: una pieza clave de la calidad de servicio en el turismo.
- Doc. 115/96 JULIO TASCÓN.- El modelo de industrialización pesada en España durante el período de entreguerras.-
- Doc. 116/96 ESTEBAN FERNÁNDEZ SÁNCHEZ; JOSÉ M. MONTES PEÓN; CAMILO J. VÁZQUEZ ORDÁS.- Sobre la importancia de los factores determinantes del beneficio: Análisis de las diferencias de resultados inter e intraindustriales.
- Doc. 117/96 AGUSTÍN RUÍZ VEGA; VÍCTOR IGLESIAS ARGÜELLES.- Elección de Establecimientos detallistas y conducta de compra de productos de gran consumo. Una aplicación empírica mediante modelos logit.
- Doc. 118/96 VÍCTOR FERNÁNDEZ BLANCO.- Diferencias entre la asistencia al cine nacional y extranjero en España.
- Doc. 119/96 RODOLFO VÁZQUEZ CASIELLES; IGNACIO A. RODRÍGUEZ DEL BOSQUE; ANA M<sup>a</sup> DÍAZ MARTÍN.- Estructura multidimensional de la calidad de servicio en cadenas de supermercados: desarrollo y validación de la escala calsuper.
- Doc. 120/96 ANA BELÉN DEL RÍO LANZA.- Elementos de medición de marca desde un enfoque de marketing.
- Doc. 121/97 JULITA GARCÍA DÍEZ; CRISTIAN MIAZZO.- Análisis Comparativo de la Información contable empresarial en Argentina y España.
- Doc. 122/97 M<sup>a</sup> MAR LLORENTE MARRÓN; D. EMILIO COSTA REPARAZ; M<sup>a</sup> MONTSERRAT DIAZ FERNÁNDEZ.- El Marco teórico de la nueva economía de la familia. Principales aportaciones.
- Doc. 123/97 SANTIAGO ALVAREZ GARCÍA.- El Estado del bienestar. Orígenes, Desarrollo y situación actual.
- Doc. 124/97 CONSUELO ABELLÁN COLODRÓN.- La Ganancia salarial esperada como determinante de la decisión individual de emigrar.
- Doc. 125/97 ESTHER LAFUENTE ROBLEDO.- La acreditación hospitalaria: Marco teórico general.
- Doc. 126/97 JOSE ANTONIO GARAY GONZÁLEZ.- Problemática contable del reconocimiento del resultado en la empresa constructora.
- Doc. 127/97 ESTEBAN FERNÁNDEZ; JOSE M. MONTES; GUILLERMO PÉREZ-BUSTAMANTE; CAMILO VÁZQUEZ.- Barreras a la imitación de la tecnología.
- Doc. 128/97 VÍCTOR IGLESIAS ARGÜELLES; JUAN A. TRESPALACIOS GUTIERREZ; RODOLFO VÁZQUEZ CASIELLES.- Los resultados alcanzados por las empresas en las relaciones en los canales de distribución.
- Doc. 129/97 LETICIA SANTOS VIJANDE; RODOLFO VÁZQUEZ CASIELLES.- La innovación en las empresas de alta tecnología: Factores condicionantes del resultado comercial.
- Doc. 130/97 RODOLFO GUTIÉRREZ.- Individualism and collectivism in human resource practices: evidence from three case studies.
- Doc. 131/97 VÍCTOR FERNÁNDEZ BLANCO; JUAN PRIETO RODRÍGUEZ.- Decisiones individuales y consumo de bienes culturales en España.
- Doc. 132/97 SANTIAGO GONZÁLEZ HERNANDO.- Clasificación de productos de consumo y establecimientos detallistas. Análisis empírico de motivaciones y actitudes del consumidor ante la compra de productos de alimentación y droguería.

- Doc. 133/97 **VICTOR IGLESIAS ARGÜELLES.-** Factores determinantes del poder negociador en los canales de distribución de productos turísticos.
- Doc. 134/97 **INÉS RUBÍN FERNÁNDEZ.-** Información sobre operaciones con derivados en los informes anuales de las entidades de depósito.
- Doc. 135/97 **ESTHER LAFUENTE ROBLEDO; ISABEL MANZANO PÉREZ.-** Aplicación de las técnicas DEA al estudio del sector hospitalario en el Principado de Asturias.
- Doc. 136/97 **VICTOR MANUEL GONZÁLEZ MÉNDEZ; FRANCISCO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ.-** La valoración por el mercado de capitales español de los procedimientos de resolución de insolvencia financiera.
- Doc. 137/97 **MARIA JOSÉ SANZO PÉREZ.-** Razones de utilización de la venta directa, los distribuidores independientes y los agentes por parte de las empresas químicas españolas.
- Doc. 138/97 **LUIS OREA.-** Descomposición de la eficiencia económica a través de la estimación de un sistema translog de costes: Una aplicación a las cajas de ahorro españolas.
- Doc. 139/97 **CRISTINA LOPEZ DUARTE; ESTEBAN GARCÍA CANAL.-** Naturaleza y estructura de propiedad de las inversiones directas en el exterior: Un modelo integrador basado en el análisis de costes de transacción.
- Doc. 140/97 **CRISTINA LOPEZ DUARTE; ESTEBAN GARCÍA CANAL; ANA VALDÉS LLANEZA.-** Tendencias empíricas en las empresas conjuntas internacionales creadas por empresas españolas (1986-1996).
- Doc. 141/97 **CONSUELO ABELLÁN COLODRÓN; ANA ISABEL FERNÁNDEZ SÁINZ.-** Relación entre la duración del desempleo y la probabilidad de emigrar.
- Doc. 142/97 **CÉSAR RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ; JUAN PRIETO RODRÍGUEZ.-** La participación laboral de la mujer y el efecto del trabajador añadido en el caso español.
- Doc. 143/97 **RODOLFO VÁZQUEZ CASIELLES; ANA MARÍA DIAZ MARTÍN; AGUSTÍN V. RUIZ VEGA.-** Planificación de las actividades de marketing para empresas de servicios turísticos: la calidad como soporte de la estrategia competitiva.
- Doc. 144/97 **LUCÍA AVELLA CAMARERO; ESTEBAN FERNANDEZ SANCHEZ.-** Una aproximación a la empresa industrial española: Principales características de fabricación.
- Doc. 145/97 **ANA SUÁREZ VÁZQUEZ.-** Delimitación comercial de un territorio: Importancia de la información proporcionada por los compradores.
- Doc. 146/97 **CRISTINA LOPEZ DUARTE; ESTEBAN GARCÍA CANAL.-** La inversión directa realizada por empresas españolas: análisis a la luz de la teoría del ciclo de desarrollo de la inversión directa en el exterior.
- Doc. 147/98 **ANA BELEN DEL RIO LANZA; VICTOR IGLESIAS ARGUELLES; RODOLFO VÁZQUEZ CASIELLES; AGUSTIN RUIZ VEGA. -** Metodologías de medición del valor de la marca.
- Doc. 148/98 **RAFAEL ALVAREZ CUESTA. -** La estimación econométrica de fronteras de producción: una revisión de la literatura.
- Doc. 149/98 **FERNANDO RUBIERA MOROLLO.-** Análisis univariante de las series de empleo terciario de las regiones españolas.
- Doc. 150/98 **JOSE ANTONIO GARAY GONZALEZ.-** Los gastos y los ingresos plurianuales.

- Doc. 151/98 **ISABEL GARCIA DE LA IGLESIA.**- La elección contable para los gastos de investigación y desarrollo.
- Doc. 152/98 **LUIS CASTELLANOS VAL; EMILIO COSTA REPARAZ.** - Teoría de sistemas y análisis económico: una aproximación metodológica.
- Doc. 153/98 **M<sup>a</sup> DEL CARMEN RAMOS CARVAJAL.** - Estimación indirecta de coeficientes input-output.
- Doc. 154/98 **RODOLFO VAZQUEZ CASIELLES; ANA MARIA DIAZ MARTIN; M<sup>a</sup>. LETICIA SANTOS VIJANDE; AGUSTIN V. RUIZ VEGA.**- Utilidad del análisis conjunto para establecer la importancia de las estrategias de calidad en servicios turísticos: simulación de escenarios alternativos en empresas de turismo rural.
- Doc. 155/98 **SANTIAGO ALVAREZ GARCIA; ANA ISABEL GONZALEZ GONZALEZ.** - El proceso de descentralización fiscal en España, especial referencia a la Comunidad Autónoma del Principado de Asturias
- Doc. 156/98 **SANTIAGO ALVAREZ GARCIA.**- La tributación de la unidad familiar. Nuevas consideraciones sobre un antiguo problema.
- Doc. 157/98 **SUSANA LOPEZ ARES; ISIDRO SANCHEZ ALVAREZ.**- Condicionantes demográficos de la economía asturiana.
- Doc. 158/98 **CELINA GONZALEZ MIERES.**- La marca de la distribución: un fenómeno que afecta a distribuidor, fabricante y consumidor.
- Doc. 159/98 **IGNACIO DEL ROSAL FERNANDEZ.**- Análisis de la demanda agregada de electricidad en España con series temporales: un tratamiento de cointegración.
- Doc. 160/98 **JESUS ARANGO.**- Evolución y perspectivas del sector agrario en Asturias.
- Doc. 161/98 **JESUS ARANGO.**- Cronología de la construcción Europea.
- Doc. 162/98 **JULITA GARCIA DIEZ; SUSANA GAGO RODRIGUEZ.**-Programas de doctorado en contabilidad en las universidad españolas: estudio empírico.
- Doc. 163/99 **MAR ARENAS PARRA; AMELIA BILBAO TEROL; BLANCA PÉREZ GLADISH; M<sup>a</sup> VICTORIA RODRÍGUEZ URÍA; EMILIO CERDÁ TENA (Universidad Complutense de Madrid).**- Aplicación de la programación compromiso a la gestión de hospitales públicos.
- Doc. 164/99 **M<sup>a</sup> DEL CARMEN RAMOS CARVAJAL.**- La comarcalización de las Tablas input-output: Una primera aproximación.
- Doc. 165/99 **LUIS IGNACIO ÁLVAREZ GONZÁLEZ; RODOLFO VÁZQUEZ CASIELLES; MARÍA LETICIA SANTOS VIJANDE; ANA MARÍA DÍAZ MARTÍN.**- Orientación al mercado como cultura de negocio y conjunto de actuaciones: Un contraste metodológico para organizaciones no lucrativas.
- Doc. 166/99 **M<sup>a</sup> JOSÉ SANZO PÉREZ.**- Funciones de los vendedores industriales de los distribuidores independientes. Una tipología realizada en el sector químico.
- Doc. 167/99 **M<sup>a</sup> BEGOÑA ÁLVAREZ ÁLVAREZ; RODOLFO VÁZQUEZ CASIELLES; FRANCISCO J. DE LA BALLINA BALLINA; M<sup>a</sup> LETICIA SANTOS VIJANDE.**- Evidencias empíricas de la promoción de ventas en los establecimientos detallistas.
- Doc. 168/99 **BEGOÑA GONZÁLEZ-BUSTO MÚGICA.**- La dinámica de sistemas como metodología para la elaboración de modelos de simulación.
- Doc. 169/99 **BEGOÑA GONZÁLEZ-BUSTO MÚGICA.**- Reflexiones teóricas sobre el personal sanitario en el Sistema Nacional de Salud Español.



- Doc. 170/99 YOLANDA ÁLVAREZ CASTAÑO.- Cómo alcanzar el éxito en el proceso de innovación tecnológica.
- Doc. 171/99 YOLANDA ÁLVAREZ CASTAÑO.- La organización del proceso de desarrollo de un nuevo producto.
- Doc. 172/99 RODOLFO VÁZQUEZ CASIELLES; MARÍA LETICIA SANTOS VIJANDE; ANA MARÍA DÍAZ MARTÍN; LUIS IGNACIO ÁLVAREZ ÁLVAREZ.- Estrategias de marketing: Desarrollo de investigaciones sobre orientación al mercado y marketing de relaciones.
- Doc. 173/99 SANTIAGO R. MARTÍNEZ ARGÜELLES; FERNANDO RUBIERA MOROLLÓN.- Patrones de convergencia regional en los Servicios de la Economía Española.
- Doc. 174/99 JUAN PRIETO RODRÍGUEZ; VÍCTOR FERNÁNDEZ BLANCO.- Are modern and classical music listeners the same people?
- Doc. 175/99 VÍCTOR MANUEL GONZÁLEZ MÉNDEZ; FRANCISCO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ.- Transferencias de riqueza y efecto contagio ante crisis bancarias. Implicaciones para las relaciones banca-industria.
- Doc. 176/99 SANTIAGO ÁLVAREZ; MARÍA TERESA ÁLVAREZ.- Impuestos medio ambientales y control de la generación de residuos. ¿Hacia una reforma fiscal verde?
- Doc. 177/99 JAVIER SUÁREZ PANDIELLO.- Rationality and rent seeking in the spanish regulation of professional soccer.
- Doc. 178/99 JAVIER SUÁREZ PANDIELLO.- Determinantes políticos del gasto público en España.