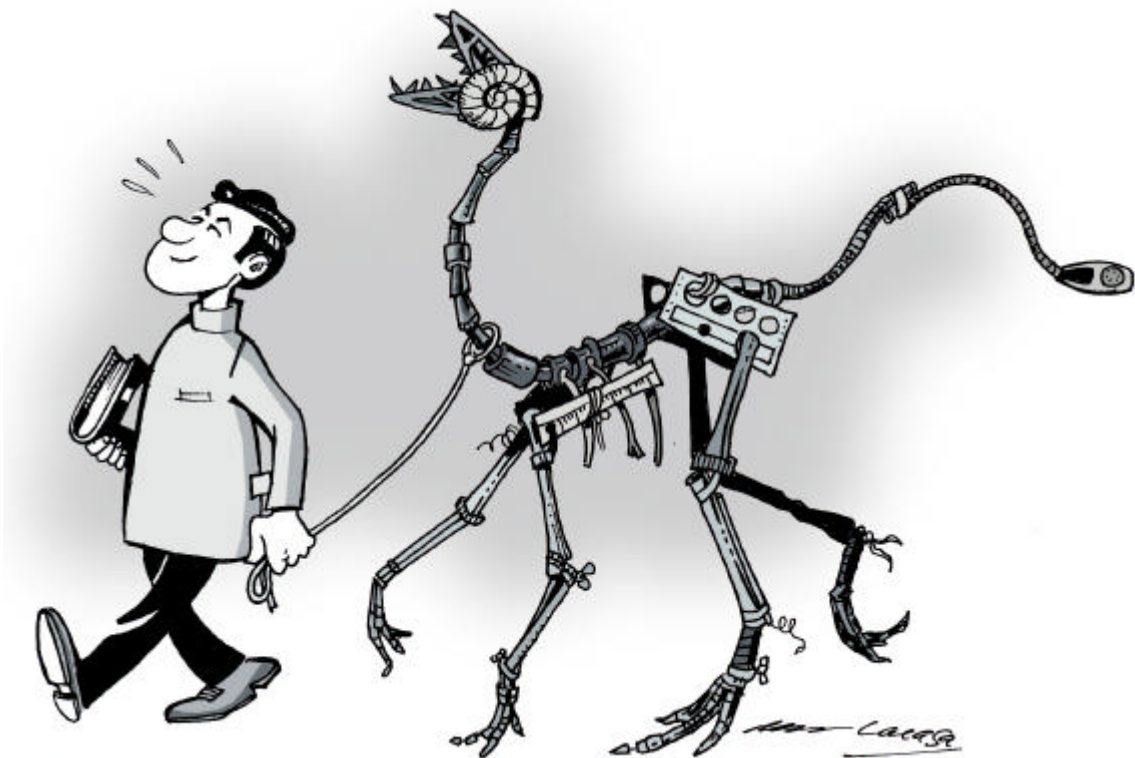


## **1. INTRODUCCIÓN**





Antes de empezar propiamente con el cuerpo del libro, es necesario conocer aunque sea muy brevemente algunos aspectos de la génesis de la Dinámica de Sistemas como disciplina o metodología. Podemos remontarnos para ello a Platón y la "Kybernetes".

## ► CIBERNETICA

La palabra Cibernética derivada del griego "Kybernetes" apareció por primera vez con Platón, y en el siglo XIX con André Marie Ampere para referirse a los modos de Gobierno.

Desde 1943 un grupo de científicos encabezado por el Matemático Nobert Wiener había reconocido la necesidad de elegir un término para designar un nuevo cuerpo de teorías e investigaciones. En 1947 decidieron adoptar la palabra Cybernetics que fue popularizada en su libro (1948) titulado "Cybernetics, or the study of control and communication in the animal and machine" y desde entonces el término no ha dejado de mantener un interés creciente. De hecho la cibernética se desarrollo como ciencia profundamente "transdisciplinar" que estudia el control y el autocontrol (Wiener) o la ciencia de la eficacia de la acción (Couffignal).

## ► ESPACIO DE ESTADO

La cibernética en general se interesa en el estudio de la diferencia entre la presencia y la ausencia de varias propiedades, también llamadas dimensiones o atributos. Por ejemplo un sistema bola de billar puede tener propiedades, como un color particular, el peso, posición o velocidad. La presencia o la ausencia de cada propiedad pueden ser

representada de forma binaria con variables Booleanas que toman dos valores "si" cuando el sistema posea la propiedad, o "no" cuando no la posea.

La representación binaria puede ser generalizada a una propiedad con múltiples valores discretos o continuos. El conjunto de todos los estados posibles del sistema se llama espacio de estado. Un componente esencial en la modelización cibernética es la medida cuantitativa del tamaño del espacio de estado, o el número de los estados diferentes. Esta medida se llama variedad. La variedad se define a partir del número de elementos del espacio de estado :  $V = \log(|S|)$

## ► ENTROPIA

El concepto de entropía apareció en la Física introducido por Clausius durante el siglo XIX. Corresponde, según sabemos, a una medida del desorden que presentan las moléculas de un gas y ha permitido dar cuenta de los equilibrios termodinámicos.

En términos estadísticos, el desorden viene dado por el número de estados en los que un sistema puede estar. Un sistema estará más desordenado que otro cuando el número de estados diferentes en los que podemos encontrar al primero es mayor que los del segundo.

En un sistema cerrado la entropía siempre aumenta de acuerdo con la ecuación de Clausius:

$$dS > 0$$

mientras en un sistema abierto el cambio total de la entropía puede escribirse según Prigogine:

$$dS = dS_i + dS_e$$

donde  $dS_e$  denota el cambio de la entropía por importación que puede ser positivo o negativo y  $dS_i$  la producción de la entropía debido a procesos irreversibles en el sistema que es siempre positivo.

## ► SISTEMAS

Algunas definiciones de sistema :

- "Un sistema es un conjunto de elementos interrelacionados" (Von Bertalanffy, 1968)
- "Un sistema se define como cualquier conjunto de variables que el observador selecciona de las disponibles en la "máquina real" (Ashby, 1952)
- "Por el momento será suficiente pensar en un sistema como un grupo de objetos físicos en una parte limitada del espacio que permanece identificable como un grupo a través de una longitud de tiempo apreciable." (Bergmann, 1957)
- "Un todo que está compuesto de muchas partes. Un conjunto de atributos" (Cherry, 1957)
- "Conjunto de partes que trabajan para lograr un objetivo común" (Forrester)
- "Una unidad compleja formada de muchos hechos a menudo diversos sujetos a un plan

común o cumpliendo un propósito común" (Tercer Nuevo Diccionario Internacional de Websters)

La existencia de un objetivo común del sistema como característica esencial del mismo que aparece en las definiciones más recientes no debe ocultarnos que los diferentes sujetos del sistema pueden tener objetivos contrapuestos entre si. Así podemos pensar que en un partido de futbol cada jugador intenta realizar un esfuerzo físico mínimo para evitar fatiga y lesiones a costa de sus propios compañeros de equipo, pero en conjunto, sin renunciar a sus objetivos individuales se comportan para lograr un objetivo común que es la victoria.

El papel del entrenador del equipo consiste precisamente en lograr una mínima armonía entre los objetivos contrapuestos de los jugadores, a través de lo que conocemos como "motivación".

## ► SISTEMAS ABIERTOS

El aproximación sistémica integra el método analítico-reduccionista que reduce el sistema a sus elementos para estudiar y entender los tipos de interacciones que existen entre ellos, suponiendo que se pueda superar los efectos de los elementos no considerados. Así este método es adecuado por los sistemas cerrados. Sin embargo Bertalanffy sabía que muchos sistemas por su propia naturaleza y definición no son sistemas cerrados. Si separamos un organismo vivo de su entorno morirá debido a la carencia del oxígeno, agua, y alimentos. Los organismos son sistemas abiertos que no pueden sobrevivir sin intercambiar continuamente materia y energía con su entorno.

En los últimos años de la década de los veinte Bertalanffy escribía: "Ya que el carácter fundamental de un objeto vivo es su organización, el acostumbrado examen de las partes y procesos aislados no puede darnos una explicación completa de los fenómenos vitales. Este examen no nos informa acerca de la coordinación de partes y procesos. Así, la tarea primordial de la biología debiera la de descubrir las leyes de los sistemas biológicos (a todos los niveles de organización). Creemos que los intentos de hallar un fundamento para la biología teórica apuntan a un cambio básico en la concepción del mundo. A esta nueva concepción, considerada como un método de investigación, la llamaremos "biología organísmica" y en tanto en cuanto se propone ser explicativa, "teoría de sistemas del organismo".

El programa organísmico fue el germen de lo que más tarde se conocería como la Teoría General de Sistemas reemplazando el término organismo por entidades organizadas tales como grupos sociales, personalidad, o ingenios tecnológicos.

Según Bertalanffy (1942): "En determinadas condiciones, los sistemas abiertos se aproximan a un estado independiente del tiempo, el llamado estado uniforme" Este estado uniforme se caracteriza por un orden relativamente alto expresado en la existencia desniveles acusados entre los componentes del sistema.

## ► TEORIA GENERAL DEL SISTEMAS

La "Teoría General de Sistemas" fue desarrollada por el biólogo Ludwig von Bertalanffy en el año 1940, al principio esta teoría no estaba enfocada a los fenómenos de regulación y mucho menos a la noción de la información, pero con más ventaja epistemológica para conseguir la unidad de la ciencia que la cibernética. Contrariamente de la cibernética, Bertalanffy se interesaba particularmente en sistemas abiertos.

El enfoque sistémico pone en primer plano el estudio de las interacciones entre las partes y entre éstas y su entorno. Aparecen relaciones comunes en distintos sistemas de diferente naturaleza, lo que lleva a la construcción de Sistemas Generales: se puede considerar un Sistema General como una clase de Sistemas Particulares con la misma estructura de relaciones, de modo que cualquiera de ellos puede tomarse como modelo de los demás. De allí viene la necesidad de construir distintas Teorías para distintos Sistemas Generales, según el contexto formal en el que los diversos autores desarrollan sus investigaciones. Ahora bien, podemos construir también una Teoría General de Sistemas para el tratamiento sistemático de las propiedades de cualquier Sistema General. Será una teoría matemática formal, sin contenido material específico.

Una Teoría General de Sistemas, idealmente aplicable a cualquier sistema real o imaginable, deberá poder tratar sistemas con cualquier número de variables de carácter continuo o discreto. Así, por ejemplo, según Mesarovic, un sistema es cualquier subconjunto de un producto cartesiano generalizado.

La importancia de las interacciones en el enfoque sistémico hará necesario distinguir entre las variables de entrada generadas por el entorno y las variables de salida generadas por el propio sistema. A su vez, en los sistemas complejos con diferentes estados internos deberemos tomar en consideración la transición temporal entre los mismos, sea mediante procesos determinísticos o probabilísticos. En los casos de mayor interés sistémico, la salida de un sistema reacciona sobre su entrada a través de un bucle de retroalimentación que provoca un proceso no lineal. Por tanto, los procesos derivados de la regulación y el equilibrio que son usuales en sistemas abiertos vivos o electrónicos serían de especial interés para la Teoría General de Sistemas.

## ► DINAMICA DE SISTEMAS

La Dinámica de Sistemas se entiende, en el sentido de Forrester (1968), como una metodología para entender el cambio, utilizando las ecuaciones en diferencias finitas o ecuaciones diferenciales. Dada la representación de estos procesos podemos estudiar la dinámica del conjunto de los estados disponibles por el sistema que es el tema central de la modelación. La Dinámica de Sistemas tiene su origen en la década de los años 30 cuando se desarrolló la teoría de los servomecanismos, que son instrumentos en los que existe una retroalimentación desde la salida a la entrada.

En la década de los años 50, aprovechando los iniciales avances de la Informática, Jay Forrester desarrolla en el MIT (Massachusetts Institute of Technology) la Dinámica Industrial. Con este instrumento, que aúna el enfoque sistémico y la simulación por ordenador, consigue avanzar en la resolución de problemas que se producen en el seno de la empresa industrial. Al final de la década publica "Industrial Dynamics" (1961).

La década siguiente, los años 60, es la década de traspaso desde el mundo de la industria al ámbito social, al final de la década aparecen los primeros resultados "Principles of Systems" (1968), "Urban Dynamics" (1969), "World Dynamics" (1971) para el Club de Roma, "Counterintuitive Behavior of Social Systems" (1971) y "The life Cycle of Economic Development" (1973). Cabe mención aparte el libro de D.L.Meadows "Dynamics of Growth in a finite World" (1972). El gran mérito de este libro es haberse publicado un año antes de la crisis de materias primas de 1973, y haber vaticinado en parte sus consecuencias.

A partir de entonces las aplicaciones, que se pueden seguir a través de los títulos publicados, se extienden a múltiples ámbitos, incluso a la ecología, que encuentra en la Dinámica de Sistemas una ayuda muy válida para el estudio de los complejos fenómenos que se producen en la naturaleza. Recientemente se observa una cierta publicidad de las aplicaciones de esta metodología a la ecología. Así aparecen en la prensa artículos que comentan los feed-backs entre diferentes elementos de los ecosistemas, su complejidad, la existencia de puntos-palanca o leverage-points, la existencia de puntos sin retorno, etc.

Su generalización al estudio de procesos socioeconómicos basada en modelos mentales no cabe duda que comporta notables dificultades, aunque es innegable que viene a cubrir una laguna existente entre los instrumentos de análisis de estos procesos que se caracterizan por su complejidad y por la existencia de múltiples relaciones de retroalimentación.

La aplicación de la Dinámica de Sistemas a la socioeconomía se basa en que en este ámbito, también se pueden definir sistemas, compuestos por unos elementos que se relacionan entre sí de forma estable, entre los cuales rigen o se cumplen unas leyes, como son las de la lógica, las de mercado, las de la demografía, etc.

De 1977 encontramos un comentario al respecto de Jaime Terceiro el cual indica que "La principal desventaja de la Programación Dinámica, excepto para casos relativamente simples en los que es posible obtener una relación analítica a la relación recurrente, es que se requiere una capacidad de memoria que supera los límites prácticos de los computadores actuales". Si bien esto era verdad en 1977, la espectacular evolución del software y del hardware de los últimos años permite que con un PC y conocimientos básicos de informática sea posible crear este tipo de modelos. Por ello podemos decir que se abre la puerta a la aplicación generalizada de esta metodología.

A medida que este instrumento ha ido adquiriendo experiencia y se han multiplicado sus aplicaciones, dentro de un ámbito limitado, aquellos que más lo utilizan lo han ido desarrollando en aspectos parciales, más o menos según sus gustos y necesidades.

## ► RETROALIMENTACION

La cibernética introduce la idea de circularidad a través del concepto de retroalimentación, bucle o feed-back, rompiendo con la ciencia newtoniana clásica en la que los efectos se encadenan de forma lineal.

La idea de circularidad desarrollada por Wiener se centra en el feed-back negativo que permite la autorregulación del sistema antes posibles perturbaciones. En 1963, Maruyama estudió el feed-back positivo que, a diferencia del negativo, amplifica la desviación (sistemas "amplificadores").

La utilización de este concepto puede permitir explicar la evolución de los sistemas sociales en los cuales existen los dos tipos de retroalimentación.

## ► LA CIBERNETICA Y LAS CIENCIAS SOCIALES

Norbert Wiener, el padre de la cibernética, era firmemente partidario de la aplicación de la cibernética a las ciencias sociales y la sociedad. Wiener se muestra convencido en sus libros "The Human Use of Human Beings" y "Cybernetics, or the study of control and communication in the animal and machine" de que el comportamiento Humano, de animales y de máquinas puede explicarse mediante los principios de la cibernética: comunicación, control de la entropía a través del aprendizaje mediante bucles de retroalimentación (Feed-back), etc.

Los cibernéticos estudiaron el sistema nervioso con el fin de entender la cognición Humana, llegando a la conclusión de que las observaciones independientes del observador no son físicamente posibles. Cuando un escritor escribe en inglés está usando una estructura en su sistema nervioso que es resultado de la interacción con el lenguaje que ha tenido desde que era niño.

Aparte de la desventaja obvia de la subjetiva influencia del investigador en sus modelos sociales, a veces puede actuar como catalizador en procesos de cambio. En la psicología el campo de la terapia familiar rastrea sus orígenes directamente de la cibernética (Watzlawick, 1967). En la terapia familiar los comportamientos inusuales pueden ser resultados de interacciones dentro de la familia. "Sostenemos básicamente que los sistemas interpersonales -grupos de desconocidos, parejas matrimoniales, familias, relaciones psicoterapéuticas, o incluso internacionales, etc.-pueden entenderse como circuitos de retroalimentación, ya que la conducta de cada persona afecta la de cada una de las otras y es, a su vez, afectada por éstas" (Paul Watzlawick).