

[5] Reflexiona.



El pensamiento sistémico y la complejidad son dos ideas que se han venido desarrollando a través de senderos distintos pero muy relacionados. Un «sistema» es un conjunto de partes organizadas con una cierta cantidad de subsistemas o componentes que interactúan entre sí. Los sistemas están formados por componentes, que son entidades del sistema cuya combinación

con otros componentes, tienen como consecuencia lograr una finalidad determinada. En el inicio de la segunda mitad del siglo XX, surgió la idea de producir una Teoría General de Sistemas, no con el fin de buscar solucionar problemas o intentar soluciones prácticas, sino producir formulaciones conceptuales para aplicarlas en situaciones de la realidad empírica.

Por otra parte, durante los últimos años del siglo XX se utilizó la palabra «complejidad» para significar la cualidad de complicado, y se ha usado en diversos campos del conocimiento como las matemáticas, la biología, la física y la sociología. Sin embargo, la teoría de la complejidad emergió como tendencia científica dominante en la década de 1990, y para algunos autores significó un aporte a la ciencia, de una importancia tal que provocaría un giro en el modo de concebir el mundo y la ciencia misma. Pero durante esos años de transición hacia el nacimiento de las ciencias de la complejidad, el uso común del término lo relacionaba con lo complicado y difícil de entender, y aparecía como una especie de hiato, de confusión, de dificultad. Ahora, el término «complejidad» ha pasado por un proceso de resignificación.

Pero para comprender el pensamiento sistémico y el concepto de complejidad, es necesario ubicar estas ideas dentro de la historia del pensamiento científico, sobre todo en los últimos seis siglos.

La ciencia es un estilo de pensamiento y de acción que constituye el origen del mundo moderno y de la mentalidad moderna. Desde la perspectiva histórica, la ciencia es un fenómeno emergente cuyas características esenciales tienen su origen en la cultura griega en el siglo VII a.C. y en el pensamiento chino que se funda sobre la relación dialógica entre el yin y el



yang. Lao Tse afirmaba que la unión de los contrarios caracteriza la realidad. En los siglos IV y III a.C. tuvo lugar la Edad Clásica de la cultura china, allí se desarrolló el taoísmo orientado al estudio de la naturaleza con un tipo de pensamiento religioso, filosófico y político. Las concepciones taoístas sobre el mundo tienen como base un principio de unidad del universo: la unidad del Cielo y de la Tierra, así como del mundo físico y de la sociedad. Por otra parte, la civilización occidental se caracteriza por la tradición de la religión judeocristiana, influenciada por la cultura griega; y son los clérigos de la edad media quienes iniciaron el desarrollo consciente de una metodología y proveyeron una primera aproximación a lo que hoy llamamos experimentación. No obstante, fue hasta la época de Isaac Newton (1642-1727) que culmina el movimiento intelectual, iniciado por Nicolás Copérnico (1473-1543) cuando sugiere el modelo heliocéntrico para reducir las complicaciones de los modelos geocéntricos, y se da la unión del empirismo y la explicación teórica.

Esta nueva visión de la ciencia, apoyada fundamentalmente en el principio de causalidad y aunada a los cambios de mentalidad que surgieron a partir del desarrollo del comercio y la producción manufacturera (siglos XVI al XVIII), trastocó la «inmutabilidad del mundo» y surgió la idea de «un mundo en movimiento». Surgió el «mecanicismo», como un enfoque filosófico de las investigaciones científicas: el mundo es como una máquina y sus fenómenos se reducen a sus partes y sus interacciones.

Así como las percepciones de la longitud, el tiempo, la fuerza y la inercia condujeron a la construcción de los conceptos de la mecánica, las percepciones de frío y calor condujeron al desarrollo de una ciencia del calor en la que el concepto principal era la temperatura.

Pero el estudio de sistemas constituidos por muchas partículas –como los gases, líquidos y sólidos– rebasaba por completo las posibilidades de la física mecanicista. Aunque fuera posible formular las ecuaciones de movimiento para cada partícula, el número de ecuaciones sería tan grande que sería poco menos que imposible resolverlas.

A mediados del siglo XVII, el científico inglés Robert Boyle constató que en los gases encerrados a temperatura ambiente, el producto de la presión por el volumen permanecía constante, y también que la temperatura de ebullición disminuía con la presión. Los sistemas de muchas partículas empezaron a ser investigados, y los trabajos experimentales recibieron un gran impulso. En 1765, el profesor y químico escocés Joseph Black realizó



un gran número de ensayos calorimétricos y distinguió claramente el calor de la temperatura. Pero el origen de la termodinámica clásica suele tomarse en 1824, cuando Carnot publicó su única y trascendental obra sobre la potencia motriz del fuego, aunque en realidad su gran aportación fue la idea del «ciclo termodinámico» y su optimización.

La termodinámica (siglo XVIII) se había comenzado a desarrollar antes de que se conociera la naturaleza atómica de la materia (siglo XIX) y al considerar sistemas en equilibrio, era posible establecer principios muy generales para determinar el comportamiento de tales sistemas. Sin embargo, el estudio de sistemas de muchas partículas llevó a la adopción de nuevos métodos basados en la estadística. Estos métodos no dan tratamiento detallado de todas y cada una de las partículas, pero dan resultados sorprendentes. La mecánica estadística aparece como eslabón entre las ciencias que se ocupan del mundo macroscópico y que lo tratan como continuo, como es el caso de la termodinámica, y las ciencias que se ocupan del mundo microscópico y reconocen a la naturaleza como compuesta de partículas discretas. Las leyes fundamentales que gobiernan la transformación de la energía fueron descubiertas y formuladas matemáticamente hacia la mitad del siglo XIX.

En el siglo XIX existía la voluntad de crear una «física social» y en 1823 Auguste Comte propuso una nueva ciencia que bautizó con el nombre de «sociología». Muchos de los problemas derivados de diferentes situaciones de la sociedad llevan a disciplinas como la antropología, la economía, la sociología y la política a aplicar métodos estadísticos. Ciertamente, la estadística permite abordar problemas más complicados que los que son tratados con los modelos mecanicistas, sin embargo, no es suficiente.

Más allá de la ciencia está el impulso que da la inquietud por saber cosas, y encontrar cómo y por qué el mundo es como es. Aquí se encuentra la diferencia con el impulso que mueve el desarrollo técnico, el impulso por hacer cosas, y por alcanzar fines prácticos.

El advenimiento de los estudios científicos sobre termodinámica estimuló la fabricación de máquinas térmicas que podían convertir el calor de la combustión en trabajo mecánico; la máquina de vapor es un claro ejemplo. Y dentro de este contexto, en 1788, el matemático e ingeniero James Watt creó un regulador centrífugo para gobernar la velocidad de las máquinas de vapor. El regulador centrífugo es el sensor de una serie de elementos conectados entre sí. Se compone de dos masas que giran alrededor de un



eje; como resultado de la rotación, las masas tienden a alejarse del eje, y mediante un sistema de palancas se puede gobernar la válvula de paso del vapor o del combustible. Así, si la velocidad de la máquina tiende a aumentar, el regulador la restringe. Esta técnica se conoce con el nombre de retroalimentación negativa, en la cual un sistema responde en la dirección opuesta a una señal. La retroalimentación negativa tiende a estabilizar la salida del sistema y procura mantener condiciones constantes.

Se considera que el regulador de Watt fue el primer dispositivo regulador que se usó en procesos industriales. Sin embargo, en Grecia en los siglos III a I a.C. se usaban mecanismos reguladores basados en flotadores para mantener el nivel del combustible en las lámparas de aceite. En el medio oriente, desde el siglo I a.C. hasta el siglo XVII, se usaban relojes de agua que tenían flotadores para regular el goteo.

La idea de la retroalimentación es una de las contribuciones más importantes de Charles Darwin, más conocido por la publicación de su libro: «El origen de las especies» en 1859. El mecanismo de selección natural abrió la puerta a una nueva forma de pensamiento científico. Existen fenómenos como la vida misma y la evolución que no pueden ser tratados adecuadamente con los métodos estadísticos.

En el tratamiento de los organismos vivos como un todo, como un sistema, más que simplemente como un conjunto de elementos relacionados entre sí, Bertalanffy señaló la importancia de distinguir entre sistemas abiertos a su ambiente y aquéllos que son cerrados. Él definió un sistema abierto (1940) como aquél que puede importar y exportar algo. En forma más general, entre un sistema abierto y su entorno puede haber intercambio de materia, energía e información.

Hasta antes de la Segunda Guerra Mundial, la teoría de control, derivada de la idea de retroalimentación, y el desarrollo de dispositivos reguladores prácticos en los Estados Unidos y Europa Occidental se realizaba de diferente manera que en Rusia y Europa Oriental. No obstante, la teoría de control tuvo un gran impulso durante la guerra debido a la necesidad de diseñar y construir aviones, sistemas de posicionamiento para la artillería, sistemas de control para los radares y muchos otros equipos basados en la retroalimentación.

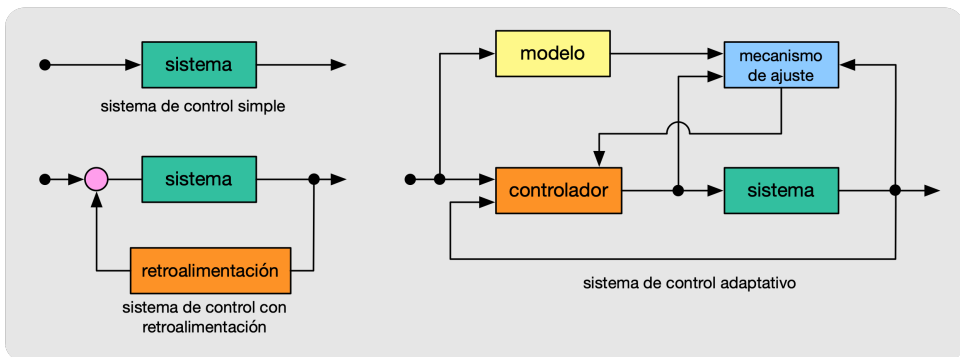
Durante la Segunda Guerra Mundial, aproximadamente una treintena de



científicos e ingenieros norteamericanos y europeos desarrollaron teorías y métodos para la construcción de sistemas automáticos de control.

El resultado de este gran esfuerzo y experiencia fue extender –durante la década de 1945 a 1955– la utilización de estas ideas para resolver una gran cantidad de problemas, mediante el uso de sistemas retroalimentados. El vínculo entre los mecanismos de control estudiados en los sistemas naturales y en los sistemas artificiales (fabricados por el hombre) se encuentra en una rama de la teoría de sistemas: la cibernética, que es una palabra que viene del griego Κυβερνήτης que significa timonel, persona que gobierna el timón de la nave. El nacimiento de la cibernética es atribuido a Norbert Wiener, que desarrolló magistralmente el tema en su libro de 1948: «Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine».

El advenimiento de las computadoras digitales a partir de 1946, promovió –en la década de 1950– un salto tecnológico enorme en la implementación de sistemas de control para la industria y el desarrollo de la navegación espacial, debido a que a partir de 1952 se desarrollaron sistemas de control numérico y sistemas programables. A partir de 1955 se desarrollaron aplicaciones aeroespaciales, y con el trabajo adicional de una decena de estudiosos de la Unión Soviética, se materializaron la «Teoría Moderna de Control» y los «Sistemas de Control Adaptativo».



La consideración de sistemas de control adaptativo tuvo su origen a partir de los desarrollos de sistemas de control con retroalimentación, para aquellos casos en los que el sistema que se quiere controlar cambia. Un

sistema de control adaptativo usa una computadora con el propósito específico de calcular los valores de los parámetros necesarios para generar la señal que gobierna al sistema, y es capaz de hacer los ajustes necesarios para optimizar la respuesta del sistema, cuando las condiciones generales cambian o hay alguna incertidumbre, mediante la comparación con un modelo que puede ser una simulación digital. Por ejemplo: durante el vuelo de un avión, su masa va disminuyendo debido al consumo del combustible que transporta en los tanques ubicados en las alas, así que el sistema de control se debe ajustar automáticamente para adaptarse a esas condiciones cambiantes.

En un principio, cuando se hablaba de sistemas, sobre todo en la ingeniería, solo se refería sistemas físicos de control, asociados a fenómenos deterministas, es decir, que están necesariamente determinados por condiciones iniciales. Sin embargo, en la segunda mitad del siglo XX surgió una transformación conceptual relacionada con la idea de sistema.

En 1956, Kenneth Boulding en un artículo publicado en la Revista «Management Science» y que tituló: «General Systems Theory – The Skeleton of Science», nos dice que la «Teoría General de Sistemas» es el nombre usado para describir un modelo teórico intermedio entre las construcciones generales de las matemáticas puras y las teorías especializadas de cada disciplina; con el propósito de estudiar todas las relaciones abstraídas de cualquier situación concreta o cuerpo de conocimiento empírico. Boulding sugirió una clasificación de nueve niveles para los sistemas:

Nivel 1. Estructuras estáticas: Lo que se podría llamar el nivel de los marcos. Esta es la geografía y la anatomía del universo: los patrones de los electrones alrededor del núcleo, el patrón de los átomos en una fórmula molecular, la disposición de los átomos en un cristal, la anatomía del gen, la célula, la planta, el animal, los mapas de la tierra, el sistema solar, el universo astronómico. La descripción exacta de estos marcos es el inicio del conocimiento teórico organizado en casi cualquier campo, ya que sin precisión en la descripción de relaciones estáticas, ninguna teoría funcional o dinámica es posible.

Nivel 2. Sistemas dinámicos simples: Este podría llamarse el nivel de los mecanismos de relojería. El sistema solar es, por supuesto, el gran reloj del universo desde el punto de vista del hombre, y las predicciones deliciosamente exactas de los astrónomos son un testimonio de la



excelencia del «reloj» que ellos estudian. Las máquinas simples como las palancas, las poleas y los engranes, incluso gran parte de la estructura teórica de la física, la química y aún de la economía, recaen principalmente en esta categoría. Los sistemas basados en el equilibrio dinámico que requieren métodos estadísticos pueden ser considerados como casos límite de los sistemas dinámicos y se pueden calificar como sistemas complicados.

Nivel 3. Sistemas cibernéticos: Podría ser apodado el nivel del termostato. Este difiere del sistema simple de equilibrio estable, principalmente en el hecho de que la transmisión y la interpretación de la información es una parte esencial del sistema. Como resultado de esto, la posición de equilibrio no es sólo determinada por las ecuaciones del sistema, sino que el sistema cambiará para mantener el equilibrio dentro de ciertos límites. Así, por ejemplo, el termostato de un horno mantendrá la temperatura deseada. La temperatura de equilibrio del sistema no está determinada únicamente por sus ecuaciones, se requiere retroalimentación. El truco, por supuesto, es que la variable esencial del sistema dinámico es la diferencia entre un estado «observado» o «registrado» y su valor «ideal» o «valor deseado». Si esta diferencia no es cero, el sistema se mueve con el fin de disminuirla, por lo que el horno envía el calor cuando la temperatura registrada es «demasiado baja» y se apaga cuando la temperatura registrada es «demasiado alta».

Nivel 4. Sistemas abiertos: Son sistemas que se autosostienen y se autorreproducen. Este es el nivel en el que la vida empieza a diferenciarse de la no vida.

Nivel 5. Genético-asociativo: Las características más destacadas de estos sistemas están, en primer lugar, una división del trabajo con partes diferenciadas y mutuamente dependientes (raíces, hojas, semillas, etc.), y en segundo lugar, una diferenciación clara entre el genotipo y el fenotipo. En este nivel no hay órganos altamente especializados y los receptores de información son difusos e incapaces de manejar información detallada.

Nivel 6. Reino animal: Nivel caracterizado por una mayor movilidad y comportamiento funcional dirigido. Se tienen receptores especializados de la información (ojos, oídos, etc.) que conducen a un enorme incremento en la adquisición de información. Sus ejemplares tienen un sistema nervioso desarrollado y un cerebro para organizar información y responder a estímulos específicos.



Nivel 7. Humano: En este nivel, el individuo se considera un sistema. Además de todas las características de los animales, el hombre posee autoconsciencia y autorreflexión. Posee lenguaje simbólico, es capaz de producir e interpretar símbolos. Tiene desarrollado el sentido del tiempo. Sabe de la existencia de la muerte y la considera en su comportamiento. Existe no solo en el tiempo y el espacio, sino en la historia, y su comportamiento es afectado profundamente por su visión de los procesos en los que participa.

Nivel 8. Organizaciones sociales: La existencia del hombre individual aislado de sus congéneres, es prácticamente desconocida. Tan esencial es la imagen simbólica de la conducta humana que se sospecha que un hombre verdaderamente aislado, no sería «humano» en el sentido generalmente aceptado, a pesar de que sería potencialmente humano. Sin embargo, es conveniente para algunos propósitos distinguir el ser humano individual como un subsistema de los sistemas sociales que lo rodean, y en este sentido, puede decirse que las organizaciones sociales constituyen otro nivel de complejidad. La unidad de estos sistemas no es tal vez la persona, sino el rol que la persona tiene en la organización o la situación en cuestión.

Nivel 9. Sistemas trascendentales: Lo último y lo absoluto, ineludiblemente incognoscible, que también muestra una estructura sistémica y relacional. Sería un día triste para el hombre cuando a nadie se le permitiera hacer preguntas que no tienen ninguna respuesta.

Nivel de complejidad		Características	Ejemplos	Disciplinas
1	estructuras estáticas	patrones de configuración	crisales, puentes	descripción en cualquier disciplina
2	sistemas dinámicos simples	movimiento predeterminado	sistema planetario, relojes	física: mecánica clásica
3	sistemas cibernéticos	retroalimentación	termostatos, homeostasis	teoría de control, cibernética
4	sistemas abiertos	estructuralmente autosostenidos (vida)	células, bacterias, hongos	teoría del metabolismo
5	genético-asociativo	organización funcional, crecimiento, reproducción	plantas, medusas	biología celular, botánica
6	reino animal	cerebro para guiar el comportamiento, habilidad para aprender	aves, bestias	zoología
7	humano	autoconsciencia, lenguaje simbólico	hombres y mujeres	biología, psicología
8	organizaciones sociales	roles, comunicación, transmisión de valores	familia, organizaciones, naciones	reloj historia, sociología, ciencias del comportamiento
9	sistemas trascendentales	ineludiblemente incognoscible	el misterio de Dios	¿?



En esta clasificación jerárquica se presupone que las propiedades que emergen en un nivel son asumidas en el siguiente nivel definido; por ejemplo, los animales (nivel 6) exhiben todas las propiedades de los niveles del 1 al 5, y tienen propiedades emergentes en el nuevo nivel. Además, la complejidad aumenta en cada nivel y es más difícil predecir el comportamiento a partir del nivel anterior. Una ventaja de mostrar una jerarquía de sistemas es que nos da una idea de la brecha que existe entre el conocimiento teórico y el empírico.

Desde la perspectiva de las ciencias físicas, se hace la distinción de tres tipos de sistemas: (a) Sistemas simples son aquéllos que constan de pocos elementos, corresponden a la física mecanicista, las variables que los describen son de carácter macroscópico y su tratamiento matemático está basado en el álgebra o en el cálculo diferencial e integral. (b) Sistemas complicados son aquéllos que constan de muchos elementos, corresponden a la física estadística, las variables que los describen son de carácter microscópico y su tratamiento matemático está basado en la estadística. (c) Sistemas complejos: la cantidad de elementos que los constituyen es suficientemente grande y no es posible tratarlos desde la perspectiva mecanicista, pero no es lo suficientemente grande para que el tratamiento estadístico sea válido; pero además, las interrelaciones de sus elementos se establecen mediante redes, más que conexiones secuenciales de un elemento con el siguiente, pueden existir variables ocultas cuyo desconocimiento impiden su análisis preciso y pueden tener propiedades que surgen espontáneamente en escalas de tiempo mayores que las escalas a las que ocurren las interacciones.

<i>Nivel de complejidad</i>	simples	complicados	complejos
cantidad de elementos:	pocos	muchos	intermedio
modelo:	mecanicista	estadístico	caos
origen del cambio:	macroscópico	microscópico	emergente
representación:	variables	estados	redes
relaciones:	causales	equilibrio	estocásticas

Veamos las diferencias entre estos tres tipos de sistemas a través de un



ejemplo.

Cuando se quiere describir el movimiento de un automóvil, es suficiente considerar su posición, su velocidad y su aceleración. Si se requiere un análisis más elaborado, tal vez sea necesario considerar la fricción del sistema de freno, la masa, la potencia del motor y la fuerza de fricción del aire. No obstante, el análisis de este tipo de situaciones se puede llevar a cabo mediante ecuaciones algebraicas sencillas. Se trata de un sistema físico simple.

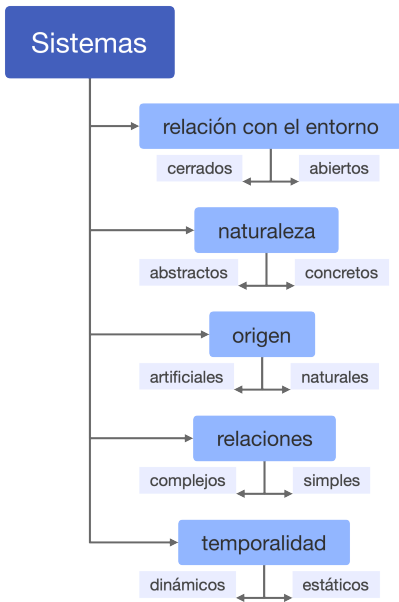
En contraste, cuando se quiere analizar el rendimiento del automóvil en términos de la cantidad de combustible que se use, el tipo de motor, la temperatura ambiente, el grado de contaminación, etcétera; se necesita un análisis termodinámico fundamentado en la física estadística, son necesarios modelos del ciclo de combustión del motor y muchos otros factores que llevan a que las matemáticas necesarias sean complicadas pero no es imposible resolver el problema. Se trata de un sistema físico complicado.

Pero cuando el automóvil en cuestión se encuentra atrapado en el tránsito, debido a que están bloqueadas algunas avenidas por una manifestación o por algún otro motivo, el análisis del movimiento o del rendimiento del vehículo debe tomar en consideración muchas otras variables. Aparecen factores como la disposición de las autoridades para controlar el tránsito, las decisiones de cada conductor para dejar pasar o no a otros vehículos, la existencia o no de lluvia, la temperatura ambiental, los criterios para desviar el flujo vehicular, la experiencia en congestiones vehiculares anteriores, etcétera. Se trata de un sistema físico complejo.

En la década de 1970, el método científico –basado en una combinación potente de pensamiento racional y experimentación– se había vuelto suficientemente poderoso como para crear una actitud moderna de supremacía, que generó reacciones en contra de la ciencia. De cualquier modo, el método de la ciencia no es todopoderoso, y un problema crucial que afronta la ciencia, es la duda sobre su habilidad para hacer frente a la complejidad, como en los casos de la meteorología y la sismología, entre otros.

En la actualidad, el pensamiento sistémico aborda el estudio de sistemas tangibles que pueden ser tanto naturales como artificiales, o intangibles





como los pertenecientes a la sociología, o a las ciencias de la conducta. Además, el pensamiento sistémico incluye varios niveles de análisis y puede aplicarse a los aspectos macroscópicos más objetivos y a los aspectos microscópicos más subjetivos.

Los hallazgos y la metodología de la ingeniería de sistemas desembocó en una cierta impaciencia por usar estas técnicas en la administración de situaciones complejas de la vida cotidiana.

Cuando se piensa en términos de sistemas del mundo real que requieren alguna corrección, se contrae el compromiso de realizar acciones que

conllevan algún propósito, como perseguir un objetivo bien definido, es decir, uno de los elementos del sistema es la intención. Por consiguiente, la declaración de la intención puede tener interpretaciones diversas que dependen del contexto de la situación. Pero la metodología de la ingeniería clásica de sistemas queda lejos de ser aplicada en estos casos. Así se llega a la necesidad de incluir conceptos como la organización, y elementos como: producción, mercado, finanzas, recursos humanos, etc. De aquí se derivó el establecimiento de la distinción «duro/suave» (hard/soft) en el pensamiento sistémico. Así como en el campo de la computación «hardware» refiere a las partes tangibles (equipos), y «software» refiere a las partes intangibles (programas y datos), el «pensamiento sistémico duro» está vinculado a las metas y objetivos de una organización, considera propósitos y metas bien definidos, los objetivos pueden expresarse en términos cuantitativos que permiten el desarrollo de modelos matemáticos, se pueden representar gráficamente mediante diagramas para los procesos involucrados; por otra parte, el «pensamiento sistémico suave» necesita observaciones cuidadosas y detalladas de las situaciones, incluidas las reacciones e interferencias, los datos son cuantitativos y cualitativos, y los modelos incluyen diversidad en los puntos de vista



expresados en las descripciones.

Ahora bien, la complejidad parece a primera vista, constituida por un conjunto de elementos heterogéneos unidos inseparablemente, que presentan la paradójica relación de lo uno y lo múltiple. La complejidad es efectivamente el tejido de eventos, acciones, interacciones, retroacciones, determinaciones y azares, que constituyen nuestro mundo fenoménico. Así es que la complejidad se presenta con los rasgos perturbadores de la perplejidad, es decir de lo enredado, lo inextricable, el desorden, la ambigüedad y la incertidumbre. Hoy la complejidad es parte de nuestro entorno.

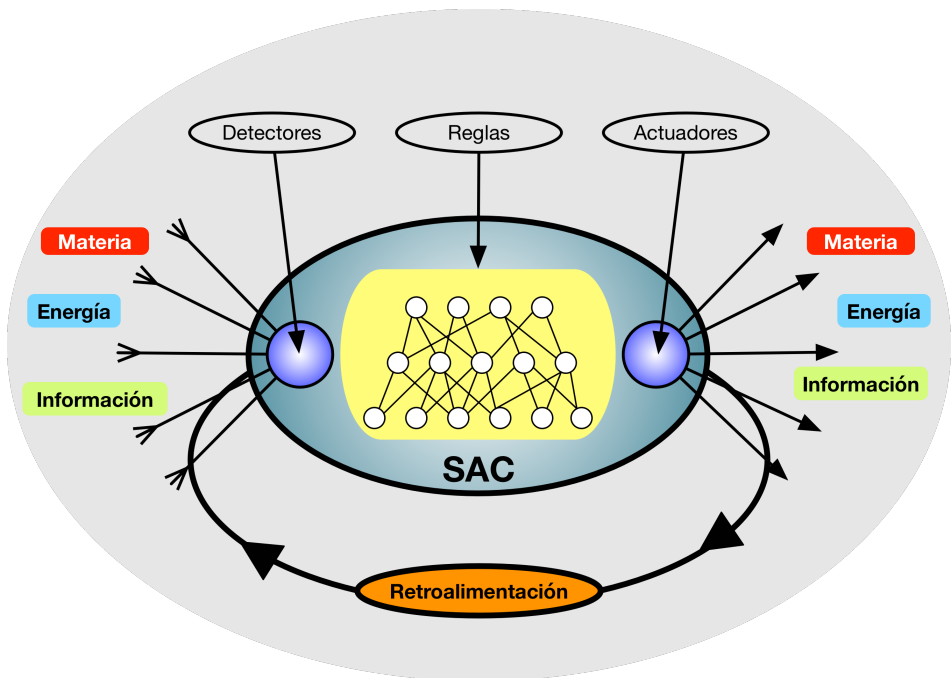
La complejidad sobrepasa el pensamiento sistémico debido a que hay casos en los que aparecen propiedades que están más allá de aquellas que provienen de los elementos del sistema. En el campo de las ciencias físicas, la complejidad está presente en los vidrios, que son materiales que tienen propiedades de sólidos y líquidos simultáneamente, en las espumas (redes de burbujas) y emulsiones (combinaciones de dos fases inmiscibles), en los coloides (partículas que no se disuelven pero se mantienen suspendidas), en la turbulencia de fluidos, en los sistemas de alta densidad de energía, etc. Además de la complejidad de los sistemas físicos, en los sistemas vivos la complejidad biológica se manifiesta por la autopoiesis, neologismo que designa la cualidad de un sistema de reproducirse y mantenerse por sí mismo. Según Humberto Maturana y Francisco Varela, los sistemas autopoieticos poseen una red de procesos que pueden crear o destruir elementos del mismo sistema como respuesta a las perturbaciones del entorno. Aunque el sistema cambie estructuralmente, dicha red permanece invariante durante toda su existencia.

Además del ámbito de la biología, la complejidad también se observa en las interacciones de los seres humanos como en la educación, la vida social, Internet, las organizaciones, los sistemas de diagnóstico médico, la ecología y la política.

Finalmente, los Sistemas Adaptativos Complejos están compuestos de elementos llamados agentes, que aprenden y se adaptan en respuesta a las interacciones con otros agentes. Un distintivo de los sistemas adaptativos complejos es la diversidad que resulta de la adaptación continua, debido a que las acciones de un agente están condicionadas por lo que estén haciendo otros agentes. Los agentes de los sistemas adaptativos



complejos tienen tres niveles de actividad: (A) Desempeño: designa la colección de comportamientos en un momento dado; los agentes son sensibles a su entorno a través de la información que detectan y también pueden modificar el entorno a través de efectores que traducen las señales internas del agente en acciones. (B) Acreditación: a medida que un agente acumula experiencia, encuentra que algunas reglas son poco útiles o inútiles, entonces, con la finalidad de adaptarse el agente requiere de una cantidad llamada fortaleza, que representa la utilidad de las reglas que ayudan a un agente a alcanzar exitosamente algo. (C) Descubrimiento de reglas: cuando un agente trata las reglas como presuposiciones que deben ser probadas, la acreditación es un proceso de confirmación, las reglas fuertes son confirmadas y las débiles son desacreditadas y remplazadas por reglas nuevas que podrían ser mejores.



Las propiedades principales de los sistemas adaptativos complejos son las siguientes:

Conectividad: La manera en que los agentes de un sistema se conectan y relacionan unos con otros es crítica para la supervivencia del sistema,



porque es a partir de estas conexiones que se forman patrones de comportamiento y se disemina la retroalimentación. Las relaciones entre los agentes son generalmente más importantes que los agentes mismos. Una manera de analizar la conectividad es mediante la teoría de redes.

Emergencia: Los agentes del sistema más que tener una planeación o estar controlados, interactúan en formas que aparentemente se deben al azar. De todas estas interacciones emergen patrones en forma de comportamientos de sus agentes en el sistema y del comportamiento del sistema mismo. Por ejemplo: un nido o montículo de termitas es una maravillosa pieza de arquitectura con un laberinto de pasajes interconectados, grandes cavernas, túneles de ventilación y mucho más. Las termitas son insectos que viven en colonias y crean su propio hábitat. La reina, los soldados, las obreras y las larvas de las termitas viven en nidos o montículos. Los nidos de las termitas tienen una base de barro o madera y pueden ser extremadamente grandes, llegan a tener un radio de 50 a 100 metros. No hay ningún gran plan, el montículo solo emerge como resultado de que las termitas están siguiendo unas simples reglas locales.

Coevolución: Todos los sistemas existen dentro de su hábitat y forman parte de ese hábitat. Por consiguiente, si el hábitat cambia, necesitan cambiar para acomodarse de la mejor manera posible a la nueva situación. Pero como son parte del hábitat, cuando cambian, también cambia el hábitat y se requiere un nuevo ajuste. Esta dinámica se convierte en un proceso permanente.

Diversidad: La diversidad de los agentes que constituyen el sistema, lo fortalecen. Si hay diversidad en los umbrales de tolerancia, cuando los agentes con el umbral más bajo cambian el hábitat, otros agentes pueden alcanzar su umbral y cambiar también. El cambio induce más cambio, las tendencias son activas, no pasivas.

Reglas simples: Los sistemas adaptativos complejos no son complicados. La emergencia de patrones puede tener una variedad muy rica, como en un caleidoscopio: un tubo ennegrecido interiormente, que encierra tres espejos que forman un prisma triangular y en un extremo dos láminas de vidrio, entre las cuales hay varios objetos de forma irregular, cuyas imágenes se ven multiplicadas simétricamente al ir volteando el tubo, a la vez que se mira por el extremo opuesto. Las reglas para construir el caleidoscopio son simples, sin embargo los patrones visuales que se



pueden formar tienen una variedad muy rica. Otro ejemplo es el ciclo del agua, la regla es simple, el vapor se eleva, el agua líquida baja; sin embargo hay cascadas, ríos, océanos, nubes, lluvia, etc.

Autoorganización: No hay jerarquía de mando o control. No tienen un plan de gestión, pero continuamente se reorganizan para alcanzar el mejor acomodo con su hábitat.

Informatización: La red de agentes que constituyen los sistemas adaptativos complejos ensamblan y acumulan información, aprenden y actúan en el hábitat producido por las interacciones de sus agentes. Un ejemplo es el sistema inmunitario que es una red compleja de células, tejidos y órganos que funcionan interrelacionados para defendernos de los gérmenes. La memoria inmunitaria se crea con la respuesta primaria a un patógeno específico y proporciona respuestas mejoradas en encuentros secundarios con ese mismo patógeno.

Efecto mariposa: Pequeños cambios en las condiciones iniciales de un sistema pueden tener efectos significativos que se pueden amplificar en cada ciclo de retroalimentación. Por ejemplo: un ruido que desencadena un alud en una montaña nevada o una colilla de cigarro arrojada en un bosque que provoca un incendio incontrolable.

Borde del caos: La teoría de la complejidad no es lo mismo que la teoría del caos, pero el caos puede tener un lugar en la complejidad. En los sistemas existe un amplio intervalo entre el equilibrio y el caos. Un sistema en equilibrio que no tenga la dinámica interna que le permita responder a los cambios de su hábitat, deja de funcionar tarde o temprano, en una palabra, muere. Un sistema en el caos, deja de funcionar como sistema. No obstante, un sistema que se encuentra en el borde del caos está en un estado de máxima variedad y así se abren nuevas posibilidades. Por ejemplo: El colapso de la Unión Soviética en unos meses en 1989 después de cuarenta años de hegemonía.

Suboptimización: Un sistema adaptativo complejo no tiene que ser perfecto para fortalecerse en su hábitat, solo necesita ser ligeramente mejor que sus competidores. Una vez que un sistema adaptativo complejo alcanza el estado que le es suficientemente bueno, sacrifica la calidad innecesaria en aras de la eficiencia y la efectividad, no gasta más energía.

Anidamiento: Muchos sistemas están anidados dentro de otros sistemas y



así muchos sistemas son sistemas cuyos agentes son sistemas más pequeños. Por ejemplo: la economía familiar, dentro de la economía nacional, dentro de la economía global.

Estamos rodeados de sistemas adaptativos complejos. Muchas de las cosas que vemos con obviaidad son sistemas adaptativos complejos. Existen agentes en esos sistemas y muchas veces los ignoramos o inconscientemente somos agentes de esos sistemas pero ello no impide nuestra participación. Los sistemas adaptativos complejos constituyen un modelo para pensar acerca del mundo que nos rodea, no son un modelo para predecir qué va a pasar. En muchas situaciones podemos ver lo que está sucediendo en términos de sistemas adaptativos complejos y eso abre una variedad de nuevas opciones, oportunidades y libertad.

