

Sistemas complejos.

Cuando se alude a la idea de ciencia, frecuentemente se considera que se habla de un conjunto organizado de conocimientos comprobables, obtenidos de la observación de fenómenos naturales y sociales y también de la experimentación y la demostración empírica de las interpretaciones que elaboramos.

No obstante, la ciencia es mucho más que eso. 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, el antecedente de la ciencia es la filosofía natural de la cultura griega del siglo VII a. C.

Ahora bien, la civilización occidental posterior a la caída del Imperio Romano de Occidente se caracterizó por la permanencia de la tradición de las religiones judeocristianas. Empero, fue hasta la Edad Media que los hombres letrados 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 (siglos XVII y XVIII) que culmina el movimiento intelectual, que había iniciado Copérnico (siglos XV y XVI) y se da la unión del empirismo y la explicación teórica.

Esta nueva visión de la ciencia se apoyó fundamentalmente en el principio de causalidad, aunada a los cambios de mentalidad que surgieron a partir del desarrollo del comercio y la producción manufacturera (siglos XVI al XVIII) y provocó que se considerara al mundo como una máquina cuyos fenómenos se reducen a la interacción de sus partes.

Con esta nueva visión científica, las percepciones de la longitud, el tiempo, la fuerza y la inercia condujeron a la construcción de los conceptos necesarios para entender el movimiento de objetos celestes y terrestres. Igualmente, las percepciones de frío y calor condujeron al desarrollo de una ciencia del calor en la que el concepto principal era la temperatura.

Con el estudio de los fenómenos termodinámicos se establecieron leyes acerca de las relaciones entre la presión, el volumen y la temperatura para el caso de los gases.

La termodinámica (siglo XVIII) se había comenzado a desarrollar antes de que se conociera la naturaleza atómica de la materia (siglo XIX). No obstante, 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.

Por otra parte, 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 deriva-



dos 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, no obstante, no es suficiente.

En otro orden de ideas, el advenimiento de la termodinámica permitió la fabricación de máquinas térmicas que podían convertir el calor de la combustión en trabajo mecánico, la máquina a vapor es un claro ejemplo.

En 1788, el matemático e ingeniero James Watt creó un regulador centrífugo para gobernar la velocidad de las máquinas a vapor al controlar 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.

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.

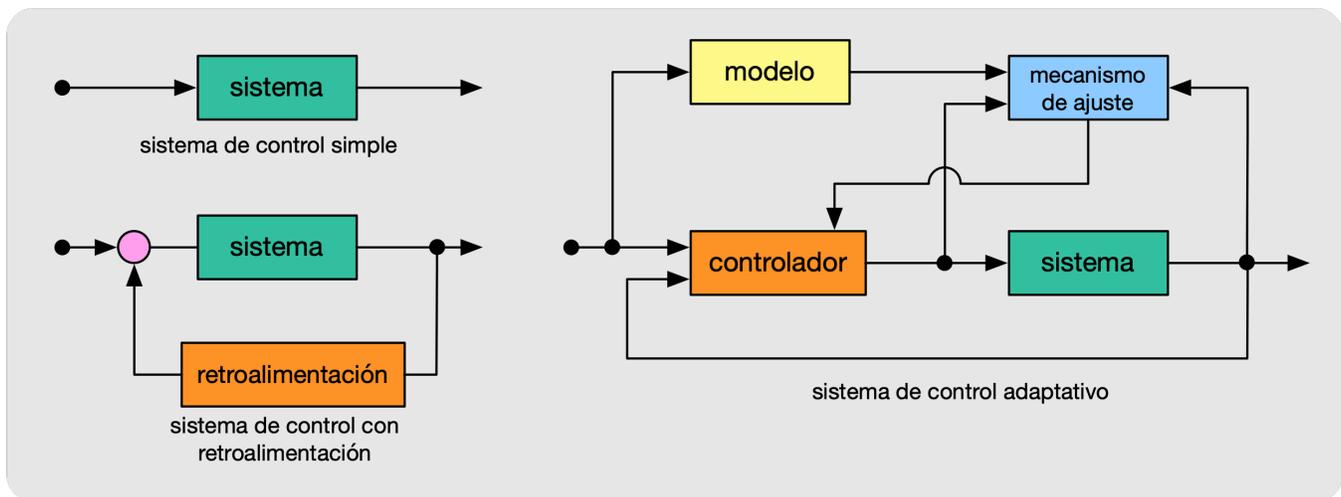
El vínculo entre los mecanismos de control estudiados en los sistemas naturales y en los sistemas fabricados por el hombre se encuentra en una rama de la teoría de sistemas: la cibernética, que es una palabra que viene del griego Κυβερνήτης que significa timonel, persona que gobierna el timón de la nave.

Queda claro que el pensamiento científico pasó por una serie de cambios fundamentales desde la filosofía natural de la cultura griega clásica hasta el siglo XIX. Más allá de la ciencia está el impulso que da la inquietud por saber cosas, 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, por alcanzar fines prácticos.

Para ser más específicos, se desarrolló la teoría de sistemas que aborda el estudio de sistemas que pueden ser tanto naturales como artificiales o pertenecientes a la sociología o a las ciencias de la conducta. Además, la teoría de sistemas incluye varios niveles de análisis y puede aplicarse a los aspectos macroscópicos más objetivos (como en la termodinámica) y a los aspectos microscópicos más subjetivos (como en la física estadística).

Todavía cabe señalar que el desarrollo 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 numéricos, programables y adaptativos. Así mismo, 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».





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 solo 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	cristales, 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	relaj 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.

En los últimos años ha surgido una transformación conceptual relacionada con la idea de sistema. Un sistema se considera un conjunto de elementos interrelacionados y que interactúan entre sí. 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.

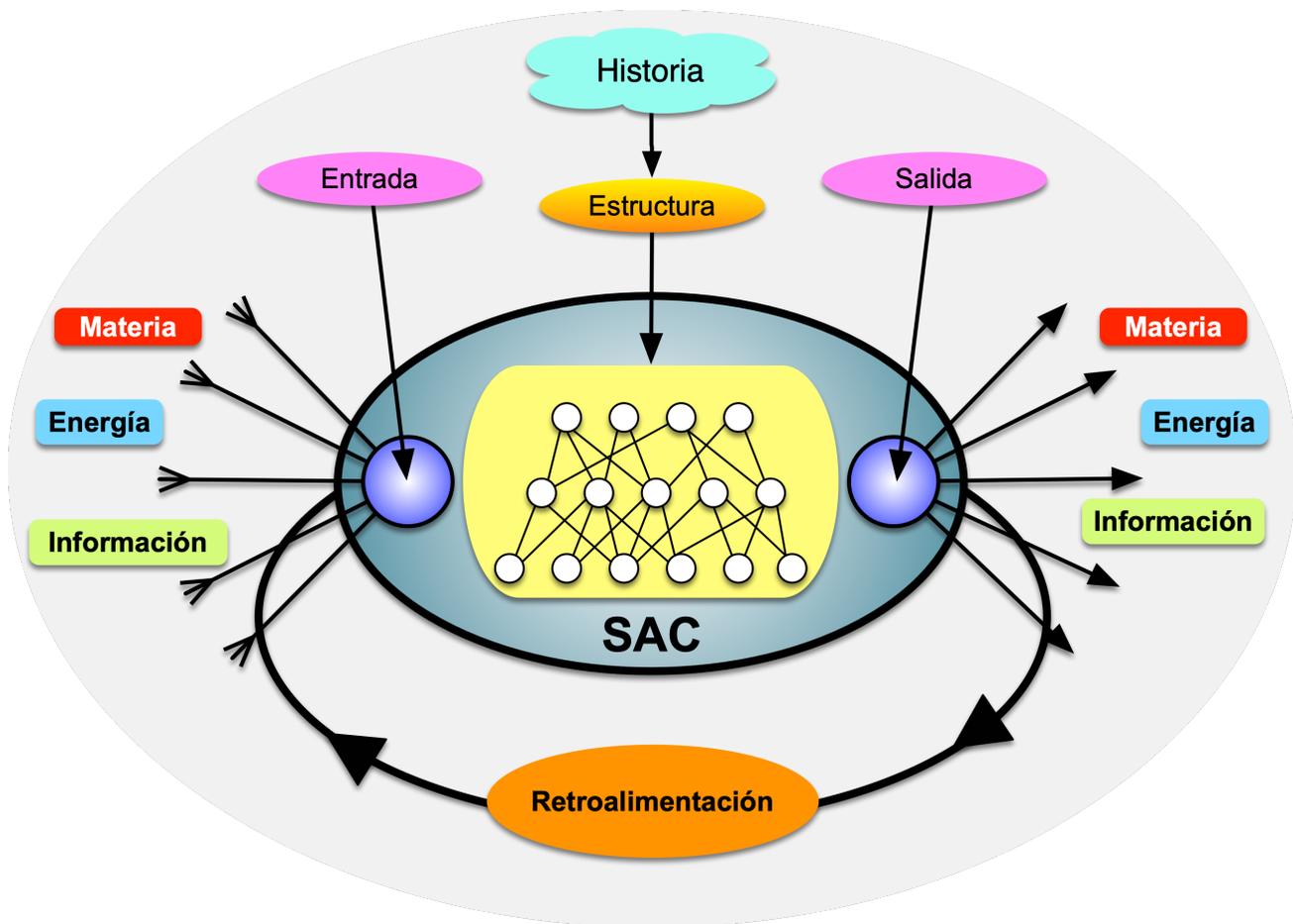
Cuando se quiere describir el movimiento de un automóvil, es suficiente considerar su posición, su velocidad y su aceleración. Si se requiere un análisis más elaborado, tal vez sea necesario considerar la fricción del sistema de freno, la masa, la potencia del motor y la fuerza de fricción del aire.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

Un sistema especial de sistema complejo es el Sistema Adaptativo Complejo (SAC). Los Sistemas Adaptativos Complejos son complejos en el sentido de la distinción elaborada anteriormente pero son adaptativos porque tiene la capacidad de cambiar y aprender de la experiencia. Algunos ejemplos de sistemas adaptativos complejos son los siguientes: la bolsa de valores, la biosfera, el sistema inmunitario, las células, el desarrollo embrionario, las colonias de hormigas, las parvadas, Internet, etcétera.





En palabras de John Holland: «Un SAC es una red dinámica de muchos agentes (los cuales pueden representar células, especies, individuos, empresas, naciones) actuando en paralelo, constantemente y reaccionando a lo que otros agentes están haciendo. El control de un SAC tiende a ser altamente disperso y descentralizado. Si hay un comportamiento coherente en el sistema, este tiene un crecimiento de competición y cooperación entre los agentes mismos. El resultado total del sistema proviene de un enorme número de decisiones hechas en algún momento por muchos agentes individuales».

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 hay 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. Un SAC una vez que 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 obvia variedad 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.

