

DINÁMICA DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS

Sergio Moriello¹
sergiomoriello@hotmail.com

El concepto de *sistema* es una abstracción que simplifica la realidad y que remite a un conjunto de elementos o partes que interaccionan dinámicamente entre sí (y con el entorno que lo rodea), que tiene una cierta permanencia dentro del espacio-tiempo y que intenta alcanzar un objetivo concreto. Para describir adecuadamente su comportamiento, es necesario conocer su *organización*: la disposición de sus elementos componentes (la parte más espacial-estática-estructural) y las interacciones o relaciones que se establecen entre ellos (la parte más temporal-dinámica-funcional) [Moriello, 2005, p. 122]. Si bien –por razones de análisis se las separa artificial y abstractamente, estas dos “*dimensiones*” coexisten y son complementarias. Se trata de una totalidad integrada, un sólo y único proceso complejo, aunque cada situación y contexto particular puede favorecer la expresión dinámica predominante de una de ellas sobre la otra.

Todo sistema está situado dentro de un cierto entorno, ambiente o contexto, que lo circunda, lo rodea o lo envuelve total y absolutamente². No obstante, hoy se cuestiona la idea de que éste *existe de antemano, está fijado y acabado*. El medio ambiente se considera ahora como un trasfondo, un ámbito o campo en donde se desarrolla el sistema y que se modela continuamente a través de las acciones que aquel efectúa [Varela, Thompson y Rosch, 1997, p. 166, 168 y 173]. En consecuencia, tanto el sistema como su entorno se encuentran en un estado de constante flujo, de fluidez, de “*diálogo*”, en donde se modifican y reconstruyen alternativa y continuamente al interactuar entre sí, “*acoplándose*” de forma mutua y recíproca [Moriello, 2005, p. 237].

¹ Sergio Alejandro Moriello es Ingeniero en Electrónica (1989), Postgraduado en Periodismo Científico (1996) y Postgraduado en Administración Empresarial (1997) y Magister en Ingeniería en Sistemas de Información (2006). Es autor de los libros Inteligencias Sintéticas e Inteligencia Natural y Sintética. Trabaja en la industria de las telecomunicaciones y lidera el Grupo de Desarrollo de Agentes Inteligentes Autónomos (en la UTN-FRBA). Es también miembro de ALAS (Asociación Latinoamericana de Sistemas) y de GESI (Grupo de Estudio de Sistemas Integrados), rama argentina de la ISSS (International Society for the System Sciences).

² A veces, es útil discriminar el entorno global de un sistema y separarlo en “*entorno próximo*” y “*entorno lejano*”. El entorno próximo es aquel accesible por el sistema (puede influir en él y ser influenciado por él); mientras que el entorno lejano es aquel inaccesible por el sistema (no puede influir en él pero es influenciado por él) [Rodríguez Delgado, 1994, p. 83/4].

Los sistemas reales

En la gran mayoría de los casos, un sistema físico real es *"abierto-cerrado"* [Grün y Del Caño, 2003, p. 114], ya que intercambia materia-energía y/o información-organización con su entorno próximo, de forma parcial y selectiva, lo cual determina su viabilidad dentro de éste. También es intrínsecamente *"dinámico"*, dado que su organización no es rígida sino que mantiene una armonía flexible con su entorno próximo a lo largo del tiempo.

Asimismo, un sistema real es *"no-lineal"*, debido a que su comportamiento es habitualmente impredecible: una pequeña causa puede producir un efecto violento y dramático o una enorme causa puede producir un efecto mínimo. Además, es *"complejo"*, dado que está compuesto por una gran cantidad de elementos, cada uno de los cuales interacciona con sus vecinos relativamente inmediatos y es muy difícil vaticinar lo que ocurrirá más allá de un cierto horizonte temporal³ [Moriello, 2005, p. 124].

Por último, en general un sistema real es *"adaptativo"*, ya que no sólo es influido por el medio ambiente sino que reacciona y se adapta –en menor o mayor medida– a él. Pero la capacidad para adaptarse tiene límites: si el sistema no puede acomodarse a la *"tensión"* (estrés) –modificando su estructura o su función– puede transformarse o deteriorarse de manera parcial o total, temporal o permanente. Esta capacidad depende tanto de la organización de su intorno como de la comunicación con su entorno [Moriello, 2005, p. 123].

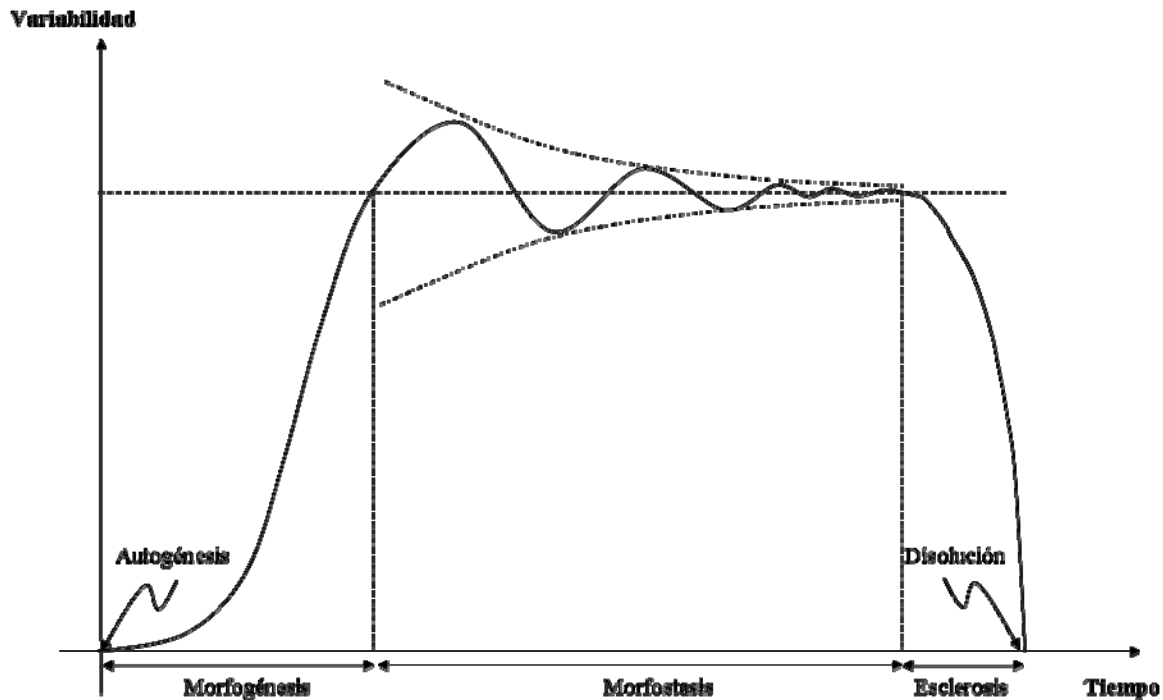
El ciclo de vida

Se podría decir que la evolución de un sistema físico real consiste en cinco etapas, cada una de las cuales responde a una cierta ley de formación [François, 1985, p. 39] [François, 2004, p. 589]:

- Autogénesis (nacimiento): aparición de un nuevo sistema a partir de la asociación de elementos inicialmente independientes entre sí.
- Morfogénesis (crecimiento): desarrollo del sistema por diferenciación interna y/o absorción y asimilación de elementos externos.
- Morfostasis (maduración): estabilización estructural del sistema, con fluctuaciones dentro de ciertos límites.
- Esclerosis (decaimiento): progresiva reducción de la capacidad de fluctuación y regulación del sistema.
- Disolución (muerte): pérdida terminal de coherencia e identidad y dispersión de los elementos constitutivos.

³ No obstante, depende del punto de vista del observador: algo que es complejo para alguien tal vez no lo sea para otro u otros.

En la mayoría de los casos, durante las etapas de nacimiento y muerte el cambio es relativamente violento, mientras que durante las etapas intermedias (crecimiento, maduración y decaimiento) los cambios son más suaves, aunque igualmente discretos [Peón Escalante y Aceves Hernández, 2006]. Pero es conveniente tener presente que la estructura funcional observada es siempre apenas un estado transitorio del movimiento único e integral que lleva a cabo el sistema. En otras palabras, un determinado cambio a corto plazo es, habitualmente, sólo la forma transitoria de un cambio a más largo plazo (y de tipo diferente) [François, 1977, p. 54].



Ciclo de vida de un sistema genérico

La estructuración disipativa

Los sistemas físicos reales sólo se mantienen viables si –de manera continua– importan energía desde su entorno próximo y exportan entropía hacia él [Wheatley, 1994, p. 129]. En otros términos, el sistema aumenta su propia organización interna (creando estructuras y funciones) sobre la base de una continua disipación de energía. Se trata, en palabras del Premio Nobel ruso-belga Ilya Prigogine, de “estructuras disipativas” espacio-temporales. Cuanto más compleja sea una estructura funcional, cuanto más coherente o intrincadamente conectada esté, más energía necesita para mantener todas sus conexiones y, por eso, más vulnerable es a las fluctuaciones internas y/o perturbaciones externas [Ferguson, 1985, p. 182/3]. Se dice, entonces, que el sistema es más “inestable”, que está “más lejos del equilibrio” o que es “fuertemente no-lineal”.

Cuando este aumento del propio orden interno se consigue por sí mismo, se hace referencia a un proceso de *"auto-organización"* espontánea. La auto-organización es la propiedad que tienen algunos sistemas de poder generar orden a partir del caos y es una parte esencial de cualquier sistema físico real⁴. Es la forma a través de la cual el sistema recupera el equilibrio, modificándose y acoplándose cada vez más estrechamente con su entorno próximo. En esta clase de fenómenos es fundamental la idea de estructuración espontánea sobre la base de niveles (por estratos, uno por encima del otro); es decir, la idea de jerarquización. Las interrelaciones entre los elementos de un nivel originan nuevos tipos de elementos en otro nivel, los cuales se comportan de una manera muy diferente [Resnick, 2001, p. 199]. Cada nuevo estado es sólo una transición, un período de *"reposo entrópico"*, en palabras de Prigogine [Siler, 1993, p. 295]. Cuantos más estados tenga el sistema, mayor será su *"variedad"* [Ashby, 1972, p. 174] y, por lo tanto, su capacidad de respuesta ante las perturbaciones. Por ende, mayor será su capacidad de supervivencia y, obviamente, su complejidad.

La autogénesis

En todos los niveles de organización de la materia, al superar una determinada *"masa crítica"*, los elementos comienzan a auto-organizarse, con lo cual generan orden a partir del desorden. Así, y en cierto sentido, la autogénesis puede interpretarse como la emergencia de algo total y absolutamente nuevo. No obstante, es importante diferenciar la autogeneración de la autoreproducción (o autopoiesis) [François, 1985, p. 40]. En efecto, la transición desde la autogénesis hasta la autopoiesis se produce a partir del momento en que el proceso se torna recursivo, cuando aparece la replicación de los elementos hasta ese momento no funcionalmente interconectados [François, 2004, p. 47] [François, 1992, p. 30].

La autopoiesis, en cambio, es la capacidad de un sistema para reproducir sus propios elementos y las interrelaciones que los unen (o sea su propia organización) [François, 1992, p. 33]. Es el proceso por medio del cual el sistema se construye y se organiza a sí mismo sin intervención del exterior, en forma continua y conservando su identidad. La característica principal de un sistema autopoietico es el principio de *"clausura operacional"*⁵, en el sentido que constituye una unidad relativamente autónoma con respecto a su entorno próximo; o

⁴ No obstante, y a decir verdad, los sistemas no se organizan sólo por sí mismos, sino que lo hacen de acuerdo con su contexto particular y con las leyes que rigen tanto para sí mismo como para su entorno próximo [Agudelo y Alcalá Rivero, 2005].

⁵ La palabra clausura se utiliza en su sentido de operación al interior de un espacio de transformaciones, como es habitual en matemáticas [Maturana y Varela, 2004, p. 53].

sea, restringe cualquier forma de intervención y/o determinación externa. Sin embargo, en realidad no existe una absoluta independencia con respecto al ambiente ya que el sistema está inextricablemente encastrado en un entorno y fundido con él [Briggs y Peat, 1994, p. 154].

La morfogénesis

La morfogénesis comienza luego de concluida la autogénesis, breve proceso en el que surge un nuevo sistema con una identidad bien determinada. Básicamente, la morfogénesis consiste en la capacidad del sistema para construir o modificar progresivamente su organización interna (su estructura funcional o su forma) con el objeto de conservar su viabilidad –dentro de su entorno próximo– durante el proceso de desarrollo (y/o crecimiento). Pero este proceso, aunque controlado por una *“trayectoria canalizada”* o *“creodo”*, admite ciertas variaciones e innovaciones siempre dentro de los límites (máximos y mínimos) que le impone su clausura operacional [François, 1992, p. 120] [François, 1985, p. 41]. En esta fase del ciclo de vida, vale aclarar, el sistema ya es autopoiético.

Durante este período el sistema experimenta la *“homeorhesis”* (fluir coordinado); o sea, la condición de mantenerse fluidamente canalizado –dentro de ciertos límites– durante su proceso dinámico de desarrollo. Corresponde a la noción de *“cambio estabilizado”* (o fluido), en oposición al *“estado estabilizado”* (o levemente fluctuante), característico de la *“homeostasis”* [François, 1985, p. 40]. Cuando el sistema se va desarrollando, su estado promedio de variabilidad se modifica de acuerdo con una tendencia de base. Sus distintos estados posibles –aunque siempre subordinados a límites definidos– también se modifican pero no siempre armónicamente [François, 1983]. Desde una perspectiva cibernética, la homeorhesis remite a procesos causales mutuos que aumentan las desviaciones (corresponde a lazos de retroalimentación positiva entre sus elementos) [Maruyama, 1985, p. 6].

La morfostasis

Durante esta etapa del ciclo de vida, la mayoría de los sistemas reales son dinámicamente estables. Intentan mantenerse en un delicado equilibrio con su entorno próximo, cambiando y modificando fluida y permanentemente sus estructuras funcionales intrínsecas. Si la perturbación externa o la fluctuación interna son relativamente pequeñas, se originan flujos y fuerzas internas que se oponen al cambio y –en cierto modo– son absorbidas por la estructura funcional preexistente [Ferguson, 1985, p. 189] [Flores y Ludueña, 1983, p. 41]. Se dice entonces que el sistema presenta una cierta *“resiliencia”*; o

sea, el sistema es capaz de integrar una determinada perturbación, sin por ello cambiar su organización interna. No es que el sistema retorne al mismo estado anterior a la perturbación, sino que –por el contrario– la incorpora creativamente gracias a múltiples cambios internos, pero preservando cualitativamente su estructura funcional. Se dice que el sistema ha sufrido un *“reajuste”*.

Durante este período el sistema experimenta la *“homeostasis”* (estabilidad dinámica); o sea, la condición de conservar y mantener su morfología y su organización –dentro de ciertos límites– a pesar de las condiciones cambiantes de su entorno. También aquí se producen algunas eventuales fluctuaciones, pero dentro de un máximo y un mínimo acotados [François, 1983]; es decir, el sistema oscila alrededor de un estado promedio de variabilidad cada vez más limitada. La diferencia con la homeorhesis es que ésta es evolutiva y permite cambios organizacionales (estructurales y funcionales) más profundos en el sistema [François, 1985, p. 41]. Desde una perspectiva cibernética, la homeostasis remite a procesos causales mutuos que reducen las desviaciones (corresponde a lazos de retroalimentación negativa entre sus elementos) [Maruyama, 1985, p. 6].

La esclerosis

Luego de finalizada la morfostasis, comienza la etapa de esclerosis, que se caracteriza por una creciente producción de entropía que impide el ingreso de más información-organización. En otras palabras, el desgaste generado por el funcionamiento del sistema físico real (en esta etapa de su ciclo de vida) introduce *“ruido”* en sus mecanismos internos de regulación y control que precipitan la generación –cada vez mayor– de errores no corregibles.

Las excesivas restricciones del sistema, entonces, reducen progresivamente su adaptabilidad hasta el punto de no sólo impedir su correcto funcionamiento sino de suprimir eventualmente su completitud y su coherencia como totalidad. El estado promedio de variabilidad del sistema va declinando de forma gradual y éste transita inevitablemente su camino hacia la disolución. La razón principal de tal proceso quizás sea la acumulación y el almacenamiento de adaptaciones adquiridas y la consiguiente reducción del limitado potencial global para posteriores adaptaciones. Este podría ser el nexo conceptual entre los procesos de envejecimiento y de esclerosis [François, 2004, p. 516].

La disolución

El sistema se desintegra cuando pierde la capacidad para mantener las interconexiones específicas entre sus elementos, base de la estabilidad de toda entidad organizada. De este

modo, y liberados ya de sus antiguas restricciones, los diferentes elementos se encuentran ahora disponibles para formar otras nuevas formas o configuraciones organizacionales [François, 1985, p. 45 y 59/60].

Dos son las fuentes de disolución de un sistema físico real: una la constituye el entorno próximo y la otra la constituye el sistema mismo [François, 1985, p. 45]. En el primer caso, una perturbación relativamente grande en el medio ambiente –que supera un determinado umbral– no puede ser absorbida por el sistema y se propaga de manera progresiva, atravesándolo totalmente. De este modo, se estrechan los límites de estabilidad del sistema y, por lo tanto, sus condiciones básicas de existencia, con lo cual se desencadena irreversiblemente un derrumbe (un colapso). En el segundo caso, se trata de un mecanismo posiblemente innato de acumulación de errores que conduce al sistema –en el largo plazo– hacia su inevitable destrucción. De manera gradual, el sistema comienza a perder su energía operativa y a aumentar su nivel de entropía. En otros términos, los diferentes subsistemas no se disuelven todos al mismo tiempo, sino que la desorganización y el deterioro del sistema son paulatinos y su comportamiento global se degrada “*elegantemente*” ante la presencia de fallas irreparables en los distintos subsistemas.

Glosario

- **Adaptabilidad:** Capacidad de un sistema para acomodar su comportamiento –en todo momento– a una gran variedad de situaciones de acuerdo con las modificaciones de su entorno. Para eso, es necesario un fluido intercambio sistema-entorno.
- **Autonomía:** Capacidad de un sistema para ejecutar sus tareas sin la intervención de otros sistemas, pero sólo dentro de ciertos límites determinados por su entorno.
- **Auto-organización:** Cualidad de ciertos sistemas de organizarse a sí mismos. Tendencia constante y espontánea de un sistema para generar patrones de comportamiento global, a partir de las interacciones entre sus componentes y a partir de las interacciones de éstos con su entorno. Es un término más general que autopoiesis.
- **Autopoiesis:** Capacidad de ciertos sistemas para producir su propia organización, de tal manera que el producto resultante es él mismo. No hay separación entre productor y producto.
- **Caos (o Impredecibilidad):** Condición de un sistema cuyo comportamiento actual depende sensiblemente de las condiciones iniciales y de ciertas situaciones de su entorno y/o de su entorno.
- **Catástrofe:** Discontinuidad brusca que conduce a un sistema desde un tipo de estabilidad dinámica hacia otra o, incluso, hacia su destrucción.
- **Causalidad mutua:** Proceso donde los elementos componentes del sistema se influyen entre sí, de manera mutua y recíproca, ya sea simultánea o alternativamente.
- **Creodo:** Trayectoria canalizada de los estados posibles de un sistema dentro de un proceso de cambio. Tanto el proceso de morfogénesis (homeorhesis) como el de morfostasis (homeostasis) se traducen por fluctuaciones dentro de un creodo.
- **Entorno (o Ambiente):** Contexto externo del sistema. Es todo aquello que pueda afectar a y ser afectado por el sistema.
- **Entropía:** Tendencia natural, constante e inevitable, que presentan ciertos sistemas a su progresiva desorganización (y, finalmente, homogeneización con su entorno), por el

transcurso del tiempo o por su propio funcionamiento. No obstante, al menos temporalmente, algunos sistemas abiertos revierten esta tendencia al aumentar sus estados de organización.

- **Estructura disipativa:** Estructura interna del sistema que se forma y/o se mantiene gracias al ingreso de energía en el sistema. Las nuevas estructuras aparecen cuando el sistema incrementa sus ingresos de energía. Peligran si escasean dichos ingresos.
- **Fluctuación:** Cambio en la magnitud de alguna cantidad física a lo largo del tiempo, con respecto a su valor normal o promedio.
- **Inestabilidad:** Condición de un sistema en la que peligran su identidad, por causa de una variación de su entorno, o de su reorganización interna.
- **Intorno:** Contexto interno del sistema. Está compuesto por todos los componentes internos y sus interrelaciones.
- **Perturbación:** Variable no deseada aplicada a un sistema y que tiende a afectar adversamente el valor de una variable controlada. Puede ser interna (si se genera dentro del sistema) o externa (si se produce fuera del sistema y es un ingreso).
- **Tensión (o Stress):** Desequilibrio interno provocado en un sistema por el ingreso de un factor de perturbación desde el entorno y caracterizado por disarmonías entre sus funciones.
- **Variedad:** Cantidad de diferentes elementos discretos dentro de un sistema.
- **Viabilidad:** Medida de la capacidad de un sistema para adaptarse y sobrevivir dentro de un entorno dinámico.

Bibliografía

1. Agudelo, Guillermo y Alcalá Rivero, Guillermo (2005): *Las estructuras disipativas en la evolución*. Ciudad de México, Seminario Ilya Prigogine, Universidad Iberoamericana, Septiembre.
2. Ashby, W. (1972): *Introducción a la Cibernética*. Buenos Aires, Editorial Nueva Visión, 2ª edición.
3. Briggs, John y Peat, David (1994): *Espejo y Reflejo: del caos al orden*. Barcelona, Editorial Gedisa, 2º edición.
4. Ferguson, Marilyn (1985): *La Conspiración de Acuario*. Barcelona, Editorial Kairós.
5. Flores, Susana y Ludueña, Miguel (1983): *Teoría General de Sistemas y Cibernética*. Cuadernos GESI (Grupo de Estudio de Sistemas), N° 7, octubre, p. 41.
6. François, Charles (1977): *Introducción a la prospectiva*. Buenos Aires, Editorial Pleamar.
7. François, Charles (1983): *Procesos, estructura y dinámica del cambio*. Buenos Aires, GESI (Grupo de Estudio de Sistemas), Curso 101, bloque 2, unidad 22.
8. François, Charles (1985): *El uso de modelos sistémicos cibernéticos como metodología científica*. Cuadernos del GESI (Grupo de Estudio de Sistemas), N° 8.
9. François, Charles (1992): *Diccionario de Teoría General de Sistemas y Cibernética*. Buenos Aires, Editado por GESI (Grupo de Estudio de Sistemas).
10. François, Charles (2004): *International Encyclopedia of Systemics and Cybernetics*. München, Editorial Saur Verlag, 2º edición.
11. Grün, Ernesto y Del Caño, Eduardo (compiladores) (2003): *Ensayos sobre Sistémica y Cibernética*. Buenos Aires, Editorial Dunken.
12. Maruyama, Magoroh (1985): *La segunda cibernética*. Cuadernos GESI-AATGSC (Grupo de Estudio de Sistemas – Asociación Argentina de Teoría General de Sistemas y Cibernética) N° 9, p. 5/31.
13. Maturana, Humberto y Varela, Francisco (2004): *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: la organización de lo vivo*. Buenos Aires, Editorial Universitaria y Editorial Lumen, 6º edición.
14. Moriello, Sergio (2005): *Inteligencia Natural y Sintética*. Buenos Aires, Editorial Nueva Librería.

15. Peón Escalante, Ignacio y Aceves Hernández, Francisco (2006): *Transdisciplinaridad y cambio trascendente en situaciones de colapso*. Buenos Aires, 1° Reunión Regional ALAS (Asociación Latinoamericana de Sistemas).
16. Resnick, Mitchel (2001): *Tortugas, Termitas y Atascos de Tráfico*. Barcelona, Editorial Gedisa.
17. Rodríguez Delgado, Rafael (1994): *Teoría de Sistemas y Gestión de las Organizaciones*. Lima, Instituto Andino de Sistemas.
18. Siler, Todd (1993): *Más allá de las barreras de la mente*. Barcelona, Editorial Paidós.
19. Varela, Francisco; Thompson, Evan y Rosch, Eleanor (1997): *De cuerpo presente*. Barcelona, Editorial Gedisa, 2° edición.
20. Wheatley, Margaret (1994): *El Liderazgo y la Nueva Ciencia*. Buenos Aires, Editorial Granica.