

## INTRODUCCIÓN A LA DINÁMICA DE SISTEMAS

*El pensamiento sistémico es práctico,  
porque todos estamos constantemente  
rodeados de sistemas.*

*Cada persona es un sistema  
que vive en un mundo de sistemas.*

O'Connor - McDermott

La principal herramienta desarrollada para aplicar los conceptos sistémicos que se han visto hasta ahora en ambientes reales, especialmente en el campo organizacional, es la dinámica de sistemas. Ésta fue desarrollada por Jay Forrester en la década de los sesenta y la verdad, es que su aplicación aún es restringida, especialmente en nuestro ambiente dónde la mayoría de las aplicaciones realizadas se presentan en el campo académico.

El presente capítulo no pretende desarrollar completamente este tema, todo lo contrario, es solamente una presentación muy general que busca interesar a los lectores frente a la herramienta y sus múltiples y útiles aplicaciones.

La dinámica de sistemas es una metodología creada para resolver problemas concretos<sup>1</sup>. La idea es explicar el comportamiento del sistema a partir del análisis de su estructura, donde las relaciones existentes entre sus elementos constituyen la estructura. A través de las herramientas presentadas por la dinámica de sistemas, se logra tener una visión más amplia y rica de la realidad.

---

<sup>1</sup> Aracil Javier. Dinámica de Sistemas. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas. Isdefe. Madrid. 1995

Los campos de aplicación de la dinámica de sistemas son muy variados, incluyéndose sistemas sociales, organizacionales y naturales. Algunos ejemplos concretos son:

- Modelos de simulación de sistemas sociológicos.
- Sistemas ecológicos y medioambientales.
- Sistemas energéticos.
- Dinámica de sistemas militares<sup>2</sup>.
- Análisis de problemas de defensa simulando problemas logísticos de las tropas y otros.

### **ESTRUCTURA ELEMENTAL DE SISTEMAS**

El primer paso en la aplicación de la dinámica de sistemas, es comprender cuál es la estructura elemental de los sistemas y en este caso, es fundamental recordar que en un capítulo anterior se habló de los bucles de realimentación como los ladrillos del pensamiento sistémico.

En un sistema entonces, se pueden considerar un conjunto **C** de componentes y las relaciones **R** existentes entre ellos. Estos son los elementos esenciales para la dinámica de sistemas. Recuérdese que la idea es describir el comportamiento del sistema a partir del análisis de las relaciones.

Para ilustrar esto, vamos a tomar un ejemplo clásico en la literatura sobre dinámica de sistemas: el proceso de llenado de un vaso con agua<sup>3</sup>.

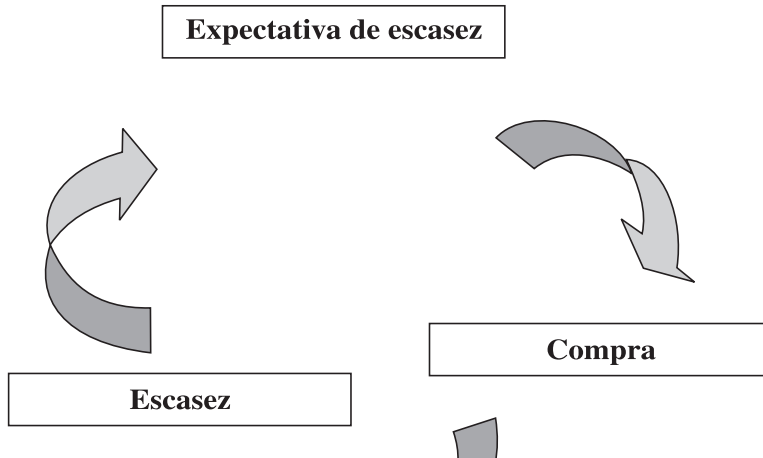
En la figura 22 se observa que quien llena el vaso, a quien podemos denominar el agente, controla el flujo de la llave a partir de la información que obtiene sobre el nivel de llenado, la cual obtiene a través de sus sentidos, buscando desaparecer la diferencia

---

<sup>2</sup>Drew Donal R. Dinámica de Sistemas aplicada. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas. Isdefe. Madrid. 1995. Dedicó un capítulo completo a la presentación de ejemplos de aplicación de la dinámica de sistemas en el campo militar.

<sup>3</sup>Aracil Javier. Dinámica de Sistemas. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas. Isdefe. Madrid. 1995.

(brecha) entre el nivel logrado y el nivel deseado. Esto es lo mismo que cualquier persona haría en el proceso de lograr un objetivo, cuando sus acciones le acercan o alejan del objetivo propuesto y debe influir sobre dichas acciones a partir de la realimentación que obtiene frente a su cercanía o lejanía del objetivo perseguido.



**Figura 22. Llenado del vaso<sup>4</sup>.**

Este proceso podría ser representado en un diagrama de influencias tal como se muestra en la figura 23. Un diagrama de influencias es una representación gráfica en el cual se muestran los elementos del sistema y las relaciones entre ellos. En el caso del diagrama presentado, se observa que el flujo de agua tiene influencia sobre el nivel del vaso.

Si además de representar la existencia de la influencia, se define si ésta es positiva o negativa mediante la utilización de signos matemáticos (+ para positiva y – para negativa), tenemos un diagrama signado, tal como se aprecia en la figura 24.



**Figura 23. Diagrama de influencia para el llenado del vaso.**

---

<sup>4</sup> Esta ilustración ha sido tomada del documento Dinámica de Sistemas de Javier Aracil disponible en las publicaciones de Ingeniería de Sistemas en [www.isdefe.es](http://www.isdefe.es). Agosto 17 de 2004.

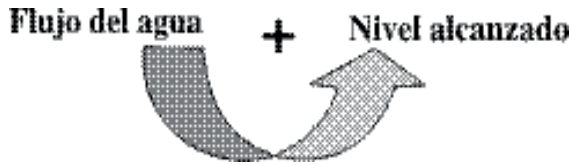


Figura 24. Diagrama signado para el llenado del vaso.

Una influencia positiva (+) significa que en la medida que el flujo del agua aumenta, aumenta el nivel alcanzado en el vaso o viceversa. Por el contrario, una influencia negativa (-) significa que una variación en un sentido de la variable que influye produce una variación en el sentido contrario de la variable influida.

Como se observa, las relaciones son cualitativas, pero aunque así sean, permiten conocer el comportamiento existente en el sistema que se está representando, lo cual se convierte en una poderosa y útil información para realizar el estudio del sistema y poder simular su comportamiento en el tiempo. En la figura 25 se aprecian los diagramas de influencia y signados para el proceso de llenado del vaso.



Figura 25. Diagrama de influencia y signado para el llenado del vaso<sup>5</sup>.

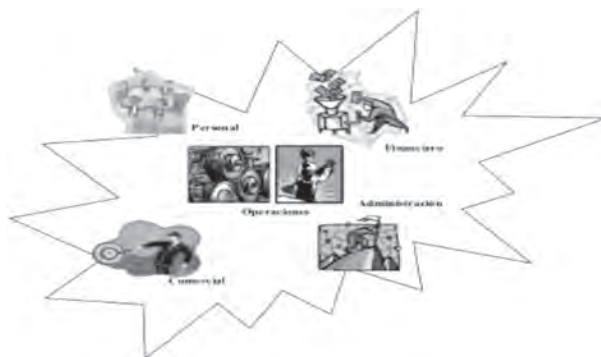
<sup>5</sup> Aracil Javier. Dinámica de Sistemas. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas. Isdefe. Madrid. 1995, disponible en [www.isdefe.es](http://www.isdefe.es). Agosto 17 de 2004.

Tal como se presentó en el capítulo sobre el pensamiento en círculos, la realimentación de compensación se da cuando el sistema se opone a los cambios que tienden a generarse debido a estímulos del entorno. Esta situación es común cuando se tratan de definir acciones para modificar el comportamiento con el fin de alcanzar un determinado objetivo.

El diagrama de un bucle de realimentación de compensación ofrece el esquema básico de todo comportamiento que se orienta a alcanzar un objetivo, tal como el presentado en el ejemplo del llenado del vaso.

Las acciones que se deben tomar son definidas gracias a la brecha existente entre el estado inicial y el objetivo deseado; a partir de estas, se generan las acciones encaminadas a lograr dicho objetivo. Los bucles de realimentación de compensación pueden ser considerados como bucles estabilizadores, que buscan eliminar o resistir las perturbaciones provenientes del entorno.

En los diagramas signados de los bucles compensadores, el resultado del producto de sus signos es negativo (-)<sup>6</sup>. En estos bucles, generalmente se realimenta la información para que el agente sepa cómo va evolucionando el estado y la brecha de éste frente al objetivo. Las figuras 26 y 27 presentan una representación gráfica del bucle compensador y el comportamiento de su dinámica en el tiempo.



**Figura 26. Bucle de realimentación de compensación<sup>7</sup>.**

---

<sup>6</sup> Este producto es el producto normal entre signos en el cual  $(+) * (+) = (+) = (-) * (-)$  y  $(+)*(-) = (-) = (-) * (+)$

<sup>7</sup>Aracil Javier. Dinámica de Sistemas. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas. Isdefe. Madrid. 1995, disponible en [www.isdefe.es](http://www.isdefe.es). Agosto 17 de 2004.



Figura 27. Bucle de compensación y su comportamiento en el tiempo<sup>8</sup>.

### BUCLE DE REALIMENTACIÓN DE REFUERZO

Contrario al bucle compensador, en éste, el estado inicial del sistema se aleja debido a las influencias del entorno, y el cambio producido se amplifica, de manera que a medida que avanza el tiempo, el sistema está alejándose cada vez más de su estado inicial. Por tanto, podemos decir que la realimentación de refuerzo inestabiliza el sistema. En este bucle todas las influencias son positivas (o de haberlas negativas, deberían compensarse por pares)<sup>9</sup>.

El ejemplo más simple de un sistema que posea esta estructura es el de una población que crece sin ninguna limitación. Cuanto mayor sea el número de individuos, mayor será su descendencia, que incrementará a su vez el número de individuos, realimentándose el bucle sin cesar<sup>10</sup>, tal como se puede ver en la figura 28. En general, los procesos de crecimiento pueden explicarse a través de los bucles de realimentación de refuerzo<sup>11</sup>.

Si no existe un límite para el crecimiento, estos bucles llegarían a crecimientos ilimitados con el tiempo, de manera que su representación obedecería a una gráfica exponencial, tal como se aprecia en la figura 29 donde se representa un bucle reforzador y su dinámica de comportamiento.

### RETRASOS

<sup>8</sup> Aracil Javier. Dinámica de Sistemas. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas. Isdefe. Madrid. 1995, disponible en [www.isdefe.es](http://www.isdefe.es). Agosto 17 de 2004.

<sup>9</sup> De manera que los productos de los signos finalmente sean positivos (+).

<sup>10</sup> Aracil Javier y Francisco Gordillo. Dinámica de Sistemas. Alianza Universidad Textos. España. 1997

<sup>11</sup> Ibid.

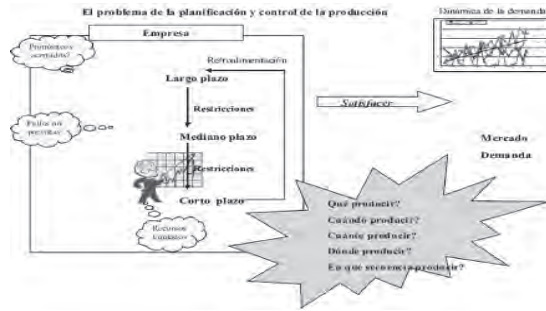


Figura 28. Ejemplo básico de bucle reforzador<sup>12</sup>.



Figura 29. Bucle reforzador y su comportamiento en el tiempo<sup>13</sup>.

Dado que los elementos de los sistemas no siempre están cerca uno del otro, o que existen muchas relaciones entre los mismos, sucede que no siempre los efectos de una acción son reflejados inmediatamente, lo cual se denomina retraso. Un retraso entonces, se presenta cuando la influencia de un elemento A sobre otro elemento B, no es inmediata.

Los retrasos pueden tener enorme influencia en el comportamiento de un sistema. En los bucles reforzadores determinan que el crecimiento no se produzca de forma tan rápida como cabría esperar. En los compensadores su efecto es más patente. Su presencia puede determinar que ante la lentitud de los resultados se tomen decisiones drásticas que conduzcan a oscilación del sistema<sup>14</sup>, por lo tanto, se puede decir que

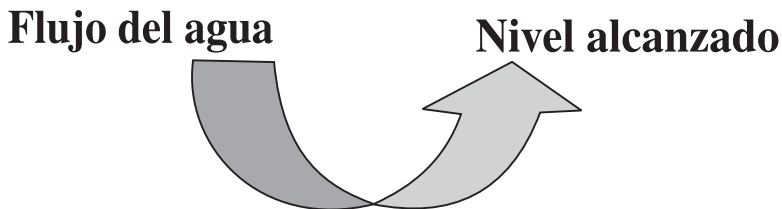
<sup>12</sup> Aracil Javier. Dinámica de Sistemas. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas. Isdefe. Madrid. 1995, disponible en [www.isdefe.es](http://www.isdefe.es). Agosto 17 de 2004.

<sup>13</sup> Ibid.

<sup>14</sup> Ibid.

estos retrasos pueden producir inestabilidad en los sistemas con realimentación compensadora<sup>15</sup>.

El retraso se representa con un par de líneas entre la relación de influencia en el diagrama. En la figura 30 se aprecia la representación de un retraso en un bucle compensador y las oscilaciones generadas por el mismo en la dinámica del sistema.



**Figura 30. Retraso en un bucle compensador y las oscilaciones que se generan<sup>16</sup>.**

### **ESTRUCTURAS GENÉRICAS DE SISTEMAS**

En la práctica, no es común encontrar sistemas que presenten únicamente un bucle de realimentación compensadora o reforzadora, lo que realmente sucede, es que dichos sistemas presenten más de un bucle de realimentación, es decir, combinaciones de los bucles de compensación y de refuerzo.

El ejemplo más sencillo de un sistema complejo con varios bucles es el de dos bucles de realimentación, uno positivo (reforzador) y uno negativo (compensador), tal como se presenta en la figura 31. Existen muchos procesos en la realidad a los que es aplicable este diagrama. Se trata de procesos en los que inicialmente se produce crecimiento, es decir, domina el bucle reforzador. Pero como todo proceso de crecimiento debe cesar, el efecto limitador aparece mediante un bucle compensador. Entonces, cuando el sistema ha logrado un nivel de crecimiento considerable, interviene el bucle compensador y se

---

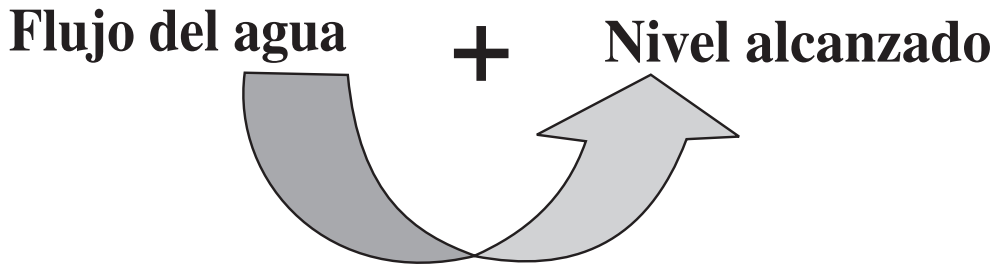
<sup>15</sup> Aracil Javier y Francisco Gordillo. Dinámica de Sistemas. Alianza Universidad Textos. España. 1997.

<sup>16</sup> Aracil Javier. Dinámica de Sistemas. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas. Isdefe. Madrid. 1995, disponible en [www.isdefe.es](http://www.isdefe.es). Agosto 17 de 2004.



vuelve dominante para el sistema<sup>17</sup>.

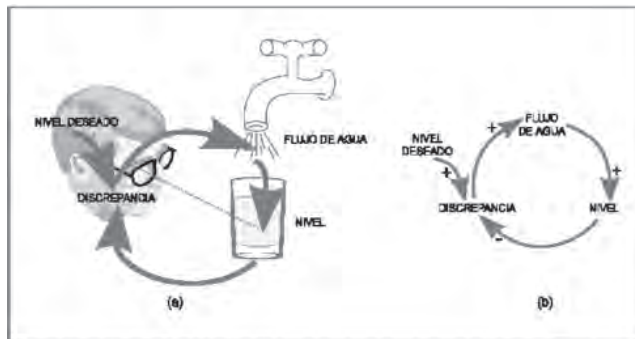
La dinámica de un sistema con este comportamiento se puede representar tal como la figura 32, la cual corresponde a la famosa ecuación logística, la cual describe el



**Figura 31. Estructura compleja: bucle compensador y bucle reforzador<sup>18</sup>.**

crecimiento de una población y ha sido tratada ampliamente en la literatura.

Existen múltiples ejemplos de procesos con crecimiento sigmoïdal, como son el proceso de difusión de una innovación tecnológica, la introducción de un nuevo pro-



**Figura 32. Crecimiento sigmoïdal (bucle compensador y reforzador)<sup>19</sup>.**

<sup>17</sup>Ibid. <sup>18</sup>Aracil Javier. Dinámica de Sistemas. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas. Isdefe. Madrid. 1995, disponible en [www.isdefe.es](http://www.isdefe.es). Agosto 17 de 2004.

<sup>19</sup>Ibid.

ducto en el mercado o la difusión de un rumor en un medio social<sup>20</sup>.

Algunas estructuras genéricas se encuentran en muchos modelos de la realidad y por tanto han sido considerados como arquetipos. Los arquetipos sistémicos más importantes son<sup>21</sup>:

**Compensación entre proceso y demora:** Este arquetipo se presenta en los sistemas en los cuales existe un retraso, pero cuando no hay conciencia de dicho retraso, se continúan las acciones, lo cual genera un desequilibrio. El esquema clásico de este arquetipo se presenta en la figura 33.

Un ejemplo típico de este arquetipo es el de la ducha de agua caliente, inicialmente se abre la llave, pero como existe una demora entre la apertura de la llave

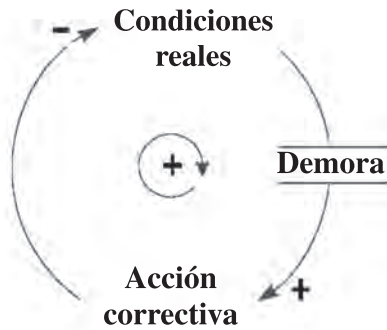


Figura 33. Compensación entre proceso y demora<sup>22</sup>.

y que comience a salir agua caliente, abrimos más la llave lo cual hace que en el momento que sale el agua caliente nos quememos; esto lleva a cerrarla un poco, pero nuevamente, dada la demora lo que hacemos es cerrarla más y entonces terminamos helándonos. Estas oscilaciones se dan por no considerar la demora existente entre el movimiento de la llave y la salida del agua. Otro ejemplo de este arquetipo se aprecia en el juego de la cerveza<sup>23</sup>.

.....  
**Limites del crecimiento:** Es el caso presentado en el crecimiento sigmoideal, cuando existe un bucle reforzador que parece llevar a un crecimiento exponen-

<sup>20</sup>Aracil Javier y Francisco Gordillo. Dinámica de Sistemas. Alianza Universidad Textos. España. 1997.

<sup>21</sup>Senge Peter. La quinta disciplina. Granica. Argentina. 1990.

<sup>22</sup>Aracil Javier. Dinámica de Sistemas. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas. Isdefe. Madrid. 1995, disponible en [www.isdefe.es](http://www.isdefe.es). Agosto 17 de 2004.

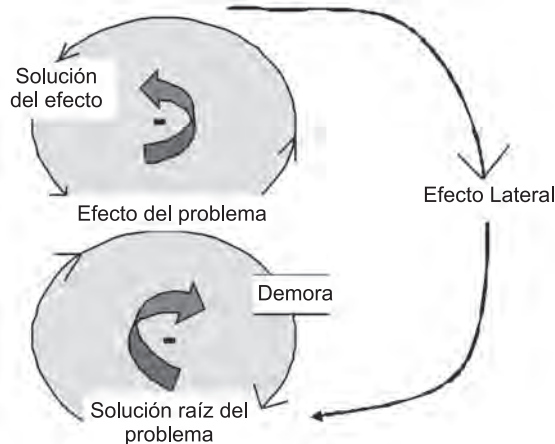
cial, pero en un momento interviene un factor limitador y empieza a dominar el bucle compensador, tal como se presenta en la figura 31.

Un ejemplo de este arquetipo se presenta en las compañías que inician con éxito en el mercado, sustentadas posiblemente en un buen servicio o producto, lo cual le lleva a crecer a un ritmo vertiginoso, pero para poder seguir el ritmo, debe incorporar nuevos recursos (sean materiales, maquinaria o personal), que al no tener la misma experticia de los anteriores, hace que desmejore el servicio o producto y el crecimiento se frena.

.....  
**Desplazamiento de la carga:** como su nombre lo indica, se refiere a las acciones que se toman para resolver un problema, pero que realmente lo que hacen es aliviarlo temporalmente pues dichas acciones no se enfocan en la causa raíz sino en algunos efectos más visibles. El problema consiste en que a medida que se descuida la causa fundamental, el problema va en aumento y a futuro, la intervención será más compleja y costosa. Una representación esquemática se encuentra en la figura 34.

Un ejemplo evidente de este arquetipo se presenta cuando las personas recurren a las drogas o el alcohol por tener problemas de relaciones interpersonales, puesto que a futuro, el problema de las drogas o el alcohol harán más difícil el relacionarse con otras personas.

**Soluciones rápidas que fallan:** similar al arquetipo anterior, pero en este caso, las decisiones se toman pensando en el corto plazo, siendo dichas decisiones efectivas, pero al no considerar el largo plazo, el efecto en el futuro puede llegar



**Figura 34. Desplazamiento de la carga.**

a ser aún peor que la situación inicial. Tal es el caso de conseguir dinero prestado para pagar un crédito, ya que inicialmente se resuelve el problema, puesto que se cancela la deuda, pero el otro crédito en el largo plazo requerirá aún una mayor cantidad para saldarse debido a los intereses. La figura 35 representa esta situación.....

**Tragedia del terreno común:** sucede cuando ante un recurso compartido, la explotación o utilización del mismo se hace de manera individual, entonces los individuos inicialmente obtendrán los beneficios buscados, pero dado el carácter limitado del recurso, en el largo plazo se agotará de manera que ninguno



Figura 35. Soluciones rápidas que fallan.

de los involucrados obtenga los beneficios esperados. Un ejemplo de ello es la explotación desmedida de los recursos naturales por parte de compañía rivales de manera simultánea. El esquema de este arquetipo se puede apreciar en la figura 36.

.....

**Erosión de metas:** aquí se presenta una estructura similar al desplazamiento de la carga, pero en este arquetipo el problema del largo plazo está relacionado con la pérdida de una meta fundamental del sistema. Tal es el caso de las empresas que van disminuyendo sus estándares de calidad de manera paulatina dada su importante participación en el mercado con el ánimo de controlar sus costos, lo que a largo plazo hace que dicha participación se pierda y el recuperarla sea mucho más difícil y por supuesto mucho más costoso. Su representación gráfica se aprecia en la figura 37.

**Escalada:** este arquetipo refleja el clásico comportamiento entre dos competidores, donde cada uno reacciona ante las acciones del otro de manera agresiva, generándose así una escalada de acciones que pueden llevar a ambos actores a consecuencias desastrosas. Se evidencia en las promociones de marcas

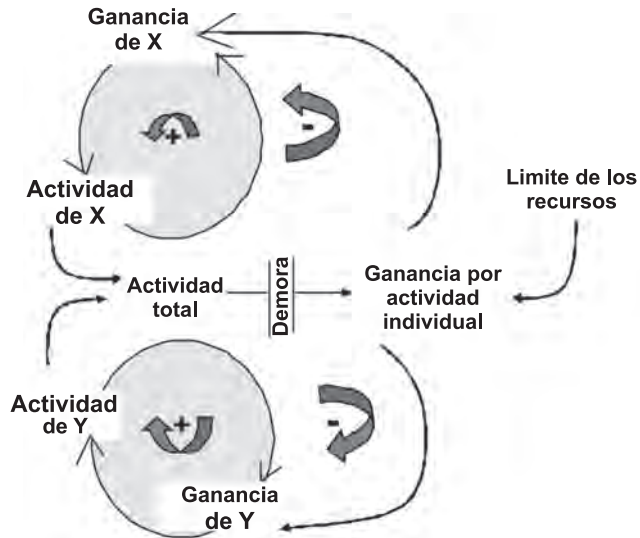


Figura 36. La tragedia del terreno común.

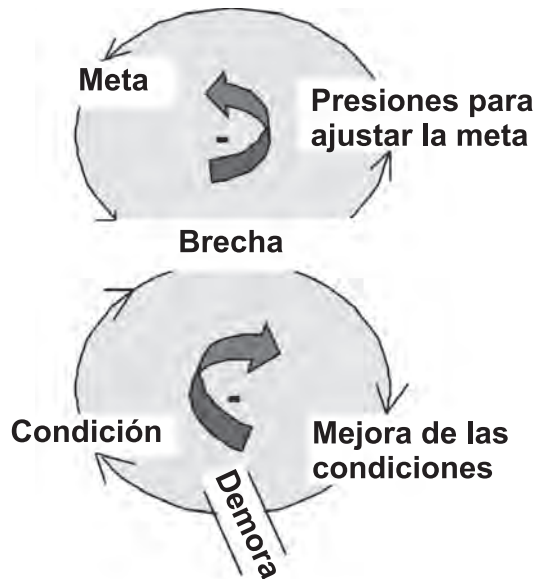


Figura 37. Erosión de metas.

competidoras tales como almacenes de cadena o productos masivos como las gaseosas, donde a la promoción del uno viene la respuesta del otro que por lo general busca mejorar la promoción ofrecida por el competidor. Su esquema se presenta en la figura 38.

.....  
**Éxito para quien tiene éxito:** cuando en actividades se presenta el uso de recursos compartidos, ante el mejor desempeño de una, viene más apoyo y por ende mayor cantidad de recursos, con lo que la otra actividad menos exitosa cada vez tiene menos opciones de mejorar puesto que los recursos para ella se ven limitados en



**Figura 38. Escalada**

la medida que se dirigen en mayor cantidad hacia la actividad de mayor éxito. En empresas con varios productos donde uno es el más exitoso y por tanto se enfocan los recursos en él, los otros van pasando a un segundo plano, llegando algunos inclusive a desaparecer. Su representación se da en la figura 39.

Estos arquetipos no representan todas las situaciones reales, pero como ya se dijo son los más genéricos y en múltiples estudios se ha llegado a ellos, por lo que es importante tener una primera aproximación a los mismos.

Tal como se dijo al principio de este capítulo, solamente se ha realizado una presentación general que busca animar al lector para que profundice en el tema y explore



**Figura 39. Éxito para quien tiene éxito.**

las múltiples alternativas para utilizar la dinámica de sistemas en el estudio de los sistemas complejos.