

Pensamiento en círculos

Bucles de realimentación: la esencia de los sistemas

El pensamiento sistémico es un pensamiento en círculos más que un pensamiento en líneas rectas. Todas las partes de un sistema están conectadas directa o indirectamente, de modo que al cambiar una de las partes el efecto se propaga a todas las demás, que experimentan un cambio y, a su vez, terminan afectando a la parte original. Entonces, la parte original responde a esa nueva influencia. Así pues, la influencia vuelve modificada a la parte original, lo que genera un bucle, no un canal de una sola dirección, que se denomina bucle de realimentación. Cuando dos partes están conectadas, la influencia se transmite en las dos direcciones; igual que una línea de teléfono: del mismo modo que llamamos por teléfono a un amigo, este amigo nos puede llamar a nosotros. Diremos que la realimentación es, por tanto, una reacción del sistema que se regenera en forma de estímulo o la información devuelta que influye en un paso siguiente.

Nuestra experiencia está hecha de bucles de realimentación, a pesar de que generalmente creemos que la influencia tiene una sola dirección. Vamos a hacer un experimento. Pongamos lentamente la yema del dedo índice sobre el punto que hay al final de esta oración. Acabamos de demostrar lo que es un bucle de realimentación. ¿Todavía no se lo creen? Vamos a hacerlo otra vez, pero ahora con los ojos cerrados. Imposible. Para acertar, necesitamos que los ojos nos den una información constante sobre la posición de la yema del dedo respecto al punto. En fracciones de segundo, realizamos pequeños ajustes continuos hasta llegar a tocar la pági-

*Bucle de realimentación*

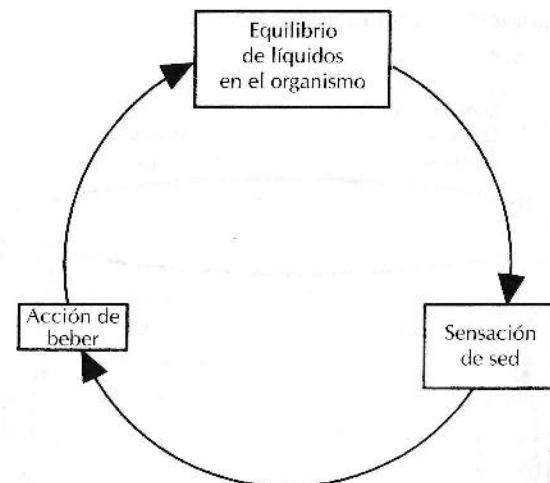
na. Podríamos comprobarlo con fotografías a alta velocidad. Al cerrar los ojos obtenemos la prueba de que la yema del dedo no va directa al punto como una flecha al ser disparada por el arco. Con la vista medimos de forma constante la posible diferencia entre la yema del dedo y el punto de la oración, y los músculos actúan en consonancia para reducir esa diferencia. El experimento es el mismo si intentamos dar a una pelota con un bate o un palo cualquiera. Si cerramos los ojos antes de dar a la pelota, aunque lo hagamos muy deprisa, comprobaremos que no es lo mismo que con los ojos abiertos. Los entrenadores no cesan de repetir: «¡No pierdas de vista la pelota!». La única forma de recibir la realimentación necesaria para dirigir nuestras acciones es mediante los sentidos: la vista, el tacto, el gusto, el olfato y el oído.

Todos experimentamos la realimentación como la consecuencia de nuestros actos que vuelve a nosotros e influye en lo que hacemos a continuación. El término «realimentación», *feedback* en inglés, suele utilizarse con el significado de «respuesta», pero lo importante es que se trata de un retorno de los efectos de una acción que influye en un siguiente paso, esto es, un vínculo de dos

direcciones. La realimentación es un bucle, por eso el pensamiento, en función de la realimentación, es un *pensamiento en círculos*.

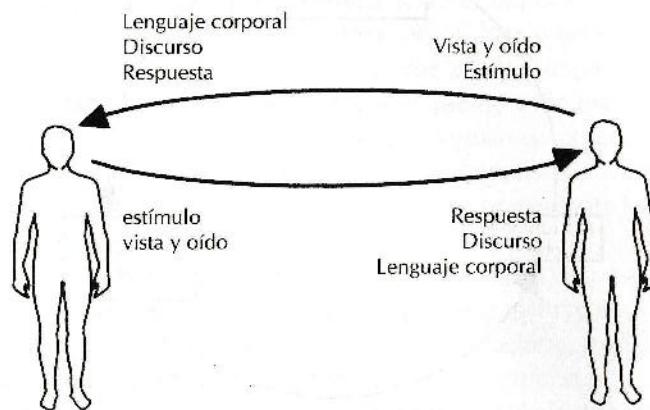
Suele decirse, con cierto eufemismo, que la crítica es «realimentación», pero sólo puede definirse así cuando genera un cambio en la persona criticada. La revisión anual del rendimiento laboral sólo será realimentación cuando genere un cambio en la forma de trabajo del individuo, bien en forma de motivación que le lleve a dar mejores resultados, bien en forma de desánimo que le lleve a adoptar una actitud de indiferencia.

La sed es un buen ejemplo de realimentación. Pensemos en lo que ocurre cuando nos damos cuenta de que tenemos sed. Primero tenemos una sensación de insatisfacción; vamos entonces a por un vaso de agua. Según la estamos bebiendo, sentimos menos sed y bebemos entonces menos agua. Seguimos bebiendo hasta que estamos satisfechos; en ese momento dejamos de beber. Es decir, la sed influye en la cantidad de agua que bebemos, y la cantidad de agua que bebemos influye en la sed. Pensamos que se trata de una sola acción, pero si lo pensamos con más detenimiento veremos que es un bucle. Sería una sola acción si supiéramos de antemano exactamente la cantidad de

*Bucle de realimentación en la red*

agua que tenemos que beber para calmar nuestra sed, y después la bebiéramos. El hambre funciona de la misma manera. Comemos hasta que nuestro apetito está satisfecho. Las sensaciones de hambre y de sed son bucles de realimentación dentro de un solo sistema: cada uno de nosotros.

Pensemos ahora en una conversación entre dos personas e imaginemos que asistimos a ella a cámara lenta y observamos lo que ocurre momento a momento. Uno de los dos piensa en lo que va a decir y luego lo dice. El otro escucha las palabras, que estimulan sus propios pensamientos, y responde. El primero responde a la respuesta del segundo. Cada respuesta se emite a través de la boca y del lenguaje corporal, y el discurso y lenguaje corporal de uno de los dos sirve de estímulo para el otro y lo recibe a través de la vista y el oído. La respuesta del primero se convierte en el estímulo del segundo, influyendo al mismo tiempo en la respuesta del segundo, que pasa a ser el estímulo del primero... Y así se va sucediendo la conversación. El receptor sabe qué decir después de escuchar al emisor. Cualquier persona que se limite a hablar a los demás haciendo caso omiso de la respuesta de los otros, interesado únicamente en el sonido de su propia voz, resulta aburrida; suele ocurrir que acaba hablando sola sin nadie que quiera escucharla.



Bucle de realimentación en la comunicación

La realimentación es tan importante para nuestras vidas que cuando no la recibimos nos la inventamos. Así, si un amigo me dice que me va a llamar y no me llama, consideraré la ausencia de la llamada como realimentación y deduciré que no se preocupa por mí, que no soy importante para él. Es imposible no comunicarse ya que aun la falta de comunicación la consideramos como realimentación, porque forma parte de nuestra experiencia.

Un ejemplo más, esta vez el sistema somos cada uno de nosotros con nuestra bicicleta. Primero, tenemos que pedalear. Si nos quedamos sentados sin pedalear nos caemos. A media que nos movemos, nuestra vista y nuestro sentido del equilibrio nos proporcionan realimentación, y alternamos continuamente el peso de nuestro cuerpo para mantener el equilibrio y movernos hacia delante. Los buenos ciclistas avanzan en línea recta, pero un principiante avanza haciendo eses porque no responde tan rápidamente a la realimentación y reacciona en exceso. Cuanto más aprendemos a ir en bicicleta, menos eses hacemos porque aprendemos a responder con más rapidez y a calcular mejor nuestra reacción. La vista y el sentido del equilibrio nos dan el estímulo y nosotros emitimos la respuesta mediante los músculos de los brazos y las piernas. Esta respuesta (el movimiento de los músculos) cambia el estado del sistema (el aprendiz más la bicicleta) y genera así un nuevo estímulo (estabilidad y dirección).

El principio de la realimentación resulta tan simple, tan omnipresente, que constantemente vivimos y respiramos bucles de realimentación sin reparar en ellos. Cuesta valorar hasta qué punto son importantes.

Asimismo, hay también bucles de realimentación en el funcionamiento de las máquinas que construimos. La realimentación es el principio por el cual las máquinas pueden funcionar sin intervención humana. Las máquinas cuyo funcionamiento se basa en circuitos de realimentación son más potentes, más fáciles de controlar y no precisan la supervisión constante de un ser humano. La máquina de vapor, por ejemplo, revolucionó la tecnología que existía en su momento, dio un nuevo impetu a la

tecnología industrial y cambió nuestras vidas y los métodos de trabajo. Hoy los circuitos electrónicos de realimentación dominan la revolución de la información, son la fuerza motriz de los ordenadores y de todos los dispositivos basados en la tecnología de los microchips, desde las lavadoras hasta los misiles.

Para ver un sencillo dispositivo de uso cotidiano con realimentación mecánica, sólo tenemos que trasladarnos a nuestro cuarto de baño. El flotador de la cisterna del inodoro mantiene el agua en un nivel constante. El principio es muy simple: hay un balón grande y hueco que flota sobre el agua y está conectado mediante una serie de palancas a una válvula que, al abrirse, permite la entrada de agua. Al tirar de la cadena, se abre otra válvula que da salida al agua de la cisterna, entonces el nivel de agua baja y con él el flotador. La caída del flotador levanta la primera válvula, con lo que la cisterna vuelve a llenarse de agua. Cuando la cisterna está llena, el nivel de agua se eleva y con él el flotador. A medida que se eleva el flotador se cierra la entrada de agua, de modo que cuando se encuentra en su tope superior, la válvula de entrada está ya completamente cerrada. Un sistema muy similar es el que controla el flujo de combustible en un coche desde el carburador hasta el motor. La presión del acelerador con el pie controla la válvula, aunque también puede hacerse mediante el mecanismo de control automático, que tiene un dispositivo de realimentación más complejo.

El termostato de una casa es otro dispositivo típico de realimentación. Fijamos la temperatura en el nivel que deseamos. Ese será el «objetivo» del sistema. Si el termómetro detecta que la temperatura ambiente ha descendido de ese nivel, establece entonces una conexión con la caldera, que producirá entonces más calor y elevará la temperatura. Tan pronto como el termómetro registre la respuesta de un aumento de temperatura, se rompe la conexión y la caldera se apaga. Es decir, nosotros fijamos el nivel adecuado, y el sistema hace el resto. Con un sistema como el que hemos descrito no se puede controlar el aumento de la temperatura en verano; para ello necesitamos otro termostato que active el aire acondicionado cuando la temperatura ambiente de la casa sea demasiado alta.

¿Se han fijado en que cuando abrimos la puerta de la nevera suele dispararse el motor? Eso ocurre porque la puerta abierta permite la entrada de aire más caliente. Al calentarse ligeramente el interior de la nevera, el termostato reacciona y activa el motor para enfriar el aire.

También nosotros tenemos nuestro propio termostato interior: un mecanismo bastante más complicado que mantiene constante la temperatura interna del cuerpo. El cuerpo fija el «objetivo» en 37 °C, y es imposible cambiarlo. Cuando tenemos calor, ocurren varias cosas. Empezamos a sudar, con lo que perdemos calor por evaporación a través de la piel. También los vasos sanguíneos más próximos a la piel se dilatan para que llegue a la superficie una mayor cantidad de sangre y el calor pase al exterior. Estas dos reacciones están fuera de nuestro control consciente, son bucles automáticos de realimentación presentes en el organismo. El cuerpo humano tolera únicamente una variación muy pequeña en cualquiera de los dos mecanismos que regulan nuestra temperatura interna.

Realimentación de refuerzo

La realimentación es fundamental en cualquier sistema; sin realimentación, no hay sistema.

Los bucles de realimentación son básicamente de dos tipos:

- El primer tipo es el de *realimentación de refuerzo*: cuando los cambios registrados en todo el sistema se realimentan para amplificar el cambio original. Dicho de otro modo: el cambio recorre todo el sistema produciendo más cambios en la misma dirección.
- El segundo tipo es el de *realimentación de compensación*, que se da cuando los cambios registrados en todo el sistema se oponen al cambio original para amortiguar el efecto.

Todos los sistemas, por muy complejos que sean, constan únicamente de estos dos tipos de bucles de realimentación.

Examinemos en primer lugar la realimentación de refuerzo. Con frecuencia se denomina «positiva» a este tipo de realimentación, pero es una denominación poco acertada ya que, por un lado, es posible confundirla con la alabanza, y por otro, da la impresión de que se trata de una realimentación buena. En realidad esta realimentación puede ser buena o un desastre si lleva al sistema a una espiral en la que se pierda totalmente el control, según lo que se amplifique con ella. Para evitar confusiones, aquí la denominaremos en todo momento realimentación «de refuerzo».

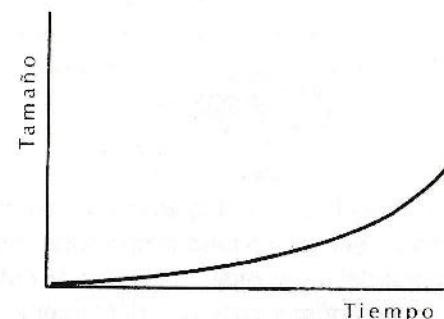
La realimentación de refuerzo dirige el sistema en la dirección que lleve. Puede favorecer su crecimiento o su declive, según el estado de partida. La recompensa es parte de un bucle de realimentación de refuerzo si conduce a un incremento del mismo comportamiento. La recompensa adopta la forma de regalos, dinero, aliento, atención o incluso una sonrisa. La acción, la recompensa y la repetición de la acción forman el bucle de realimentación de refuerzo. La recompensa por sí sola no es realimentación de refuerzo, a menos que dé como resultado más de lo mismo.

Pensemos en una bola de nieve rodando por una colina. A medida que baja va cogiendo más nieve y cuanto más grande se hace más nieve tiene, hasta que se convierte en un alud.

¿Sabía usted que su cuenta bancaria es un sistema? En una cuenta de ahorro se produce la realimentación de refuerzo. Supongamos que ponemos 200.000 pesetas en una cuenta de ahorro a un interés anual del 10 por ciento. El primer año obtendremos unos dividendos de 20.000 pesetas que, sumados al capital inicial, harán un total de 220.000 pesetas. El segundo año, volverá a incrementarse el 10 por ciento sobre esa cantidad: 22.000 pesetas, con lo que nuestro capital pasará a ser 242.000 pesetas. Al año siguiente los dividendos serán aún mayores. Cuanto mayor sea el capital, mayores serán los dividendos, que, a su vez, volverán a incrementar el capital. Si seguimos con este mismo ejemplo, sólo al cabo de siete años, el capital inicial se habrá más que duplicado. Cada siete años volverá a duplicarse, de modo que un depósito de 200.000 pesetas el día en que nace-

mos se habrá convertido en más de 2.800.000 pesetas cuando cumplamos 21 años. La realimentación de refuerzo constante lleva a un crecimiento exponencial, el incremento es proporcional a lo que ya hay, con un tiempo de duplicación constante.

Para ilustrar la realimentación de refuerzo nos serviremos de la imagen de la bola de nieve:



Realimentación de refuerzo: crecimiento exponencial

Crecimiento exponencial: acertijos



- 1 Imaginemos que doblamos un papel por la mitad de modo que adquiere el doble de grosor. ¿Qué grosor llegaría a alcanzar si pudiéramos doblar el mismo papel otras cuarenta veces?



- 2 Somos los propietarios de un estanque. En una de las esquinas del estanque empieza a crecer un pequeño nenúfar. Cada

día que pasa el nenúfar se duplica de tamaño. Empieza siendo muy pequeño, pero al cabo de 30 días, nos damos cuenta de que el nenúfar cubre la mitad del estanque. No queremos que llegue a cubrir el estanque entero porque entonces no dejaría sitio para otras plantas, pero estamos demasiado ocupados y decidimos dejarlo ahí hasta más adelante. ¿Qué pasará?



- ③ Dice la leyenda que el juego del ajedrez fue inventado hace miles de años en Oriente como pasatiempo para un rey. Como premio, el inventor del juego pidió al rey una recompensa: un grano de arroz por el primer cuadrado del tablero, dos por el segundo cuadrado, cuatro por el tercero y así siguió doblando el número de granos hasta llegar al último cuadrado. El tablero de ajedrez tiene 64 cuadrados. El rey sabía que poseía en su reino cientos de silos de arroz y decidió aceptar la propuesta. ¿Fue acertada la decisión del rey?

Respuestas en la página 83.

La población y el crecimiento exponencial

El crecimiento de la población es exponencial si no se produce ningún otro cambio. A mediados del siglo XVII, la población mundial se situaba cerca de los quinientos millones de personas. Estaba creciendo, y si la tasa de crecimiento se hubiera mantenido constante, en 150 años se habría duplicado.

Doscientos cincuenta años más tarde, a principios del siglo XX, superaba los mil quinientos millones de personas y el tiempo de duplicación era ya de 140 años. La tasa de

crecimiento aumentaba debido al descenso de las tasas de mortalidad. En 1991, la población mundial era casi de cinco mil quinientos millones de personas, los índices de natalidad habían descendido a una velocidad ligeramente superior a la de las tasas de mortalidad durante los 20 años anteriores y la tasa de crecimiento de la población se situaba en 1,7 por ciento. Incluso una tasa de crecimiento tan pequeña supone un enorme incremento en el número de personas al ser tan numerosa la base de población (supone un aumento anual de 92 millones de personas, lo que equivale a un incremento de 250.000 personas diariamente).

Mientras la fecundidad sea superior a la mortalidad, es decir, mientras el índice de natalidad sea superior a la tasa de mortalidad, el crecimiento de la población será exponencial. Cuando la fecundidad es igual a la mortalidad, la cantidad de personas se mantiene estable, es decir, cada año nace y muere el mismo número de personas. Cuando la mortalidad es superior a la fecundidad la población disminuye. En todas las poblaciones es así.

Los índices de natalidad y mortalidad no son constantes en todo el mundo; en algunos países la población va en aumento, en otros va en descenso y en otros se mantiene estable. El crecimiento mundial de la población es el resultado conjunto de todas esas cifras. Según los últimos informes, parece bastante probable que la población mundial alcance la cifra máxima de diez mil quinientos millones de personas en el año 2080 y después empezará a disminuir.¹ Esta previsión presupone el mantenimiento de las tendencias actuales: el índice de natalidad está disminuyendo en todo el mundo y la esperanza de vida en el Tercer Mundo aumenta a un ritmo de sólo un año por decenio.

1. Lutz, Dr. W., y col., *The Future Population of the World: What can we assume today?*, Earthscan, 1996.

Recapitulemos: la realimentación de refuerzo conduce a cambios en la misma dirección que el cambio inicial. Cuando el cambio inicial lleva una dirección favorable, se produce un gran beneficio. Pero ¿qué ocurre si el cambio inicial no es favorable? La realimentación de refuerzo puede llevar tanto a un círculo vicioso como a una cadena de acontecimientos positivos.

Tomemos el ejemplo de una cuenta de ahorro o cualquier inversión de capital. Cuando la inversión es positiva, el bucle de refuerzo genera más riqueza, de modo que podemos invertir más. Si no hay inversión, no hay cambio. Pero si debemos dinero, la deuda aumentará a gran velocidad. Si contraemos con una tarjeta de crédito una deuda de 200.000 pesetas con un índice de crecimiento anual del 20 por ciento, por ejemplo, al final del

Metáforas sobre la realimentación de refuerzo

¿Ha escuchado o pronunciado alguna vez alguno de estos dichos? Normalmente, indican que se está produciendo un bucle de refuerzo:

- Estar en la cresta de la ola.
- Subirse al carro.
- Cuesta abajo y sin frenos.
- Caer en el olvido.
- De aquí al cielo.
- Un billete al paraíso.
- Una vez al año no hace daño.
- Ir *in crescendo*.
- Pisar terrenos resbaladizos.
- Cada vez se pone la cosa mejor (peor).
- Crecer como una bola de nieve.

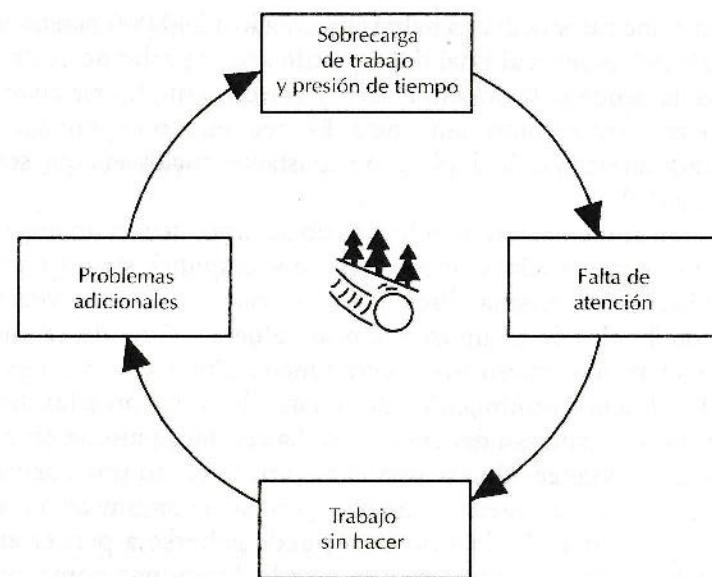
Pero no olvidemos que nada es eterno.

primer año nuestra deuda habrá aumentado a 240.000 pesetas y a 288.000 pesetas al final del segundo año. Al cabo de cuatro años, la deuda se habrá duplicado, y volverá a duplicarse cuando transcurran cuatro años más. El crecimiento exponencial implica un tiempo de duplicación constante, cualquiera que sea la cantidad.

La realimentación de refuerzo no siempre lleva a un crecimiento exponencial explosivo, pero sí *amplifica* siempre un cambio en la misma dirección. La comunicación a veces adopta bucles de realimentación de refuerzo. Cuando se inicia en términos amistosos es como meter dinero en una cuenta. Los buenos sentimientos dominarán la situación y las dos personas disfrutarán del encuentro. La confianza mutua genera más confianza. Un encuentro neutro es como una cuenta vacía, tiende a mantenerse neutro; pero si la comunicación se inicia con mal pie, la situación puede echarse a perder en breve. La desconfianza mutua puede funcionar como un bucle de realimentación de refuerzo. Así, cuando unas personas desconfían de otras, hay más probabilidades de que haya malentendidos y, después, las personas implicadas se sentirán con derecho a tomarse la revancha. Si el bucle de refuerzo no encuentra ningún freno, puede llevar a una escalada de violencia y hostilidad mutua entre personas o incluso a guerras entre naciones.

Otro ejemplo de realimentación de refuerzo que desencadena efectos beneficiosos es el progreso en el aprendizaje y la adquisición de conocimientos. Aunque el proceso de conocer es intangible, también está dirigido por un bucle de realimentación de refuerzo. Cuanto mayor es el conocimiento, más aprendemos, pues podemos establecer más conexiones con lo que ya sabemos y, así, más ampliamos y profundizamos nuestros conocimientos.

Pongamos ahora un ejemplo de círculo vicioso: un ejecutivo sobrecargado de trabajo que no consigue concentrarse en un proyecto. La falta de concentración le lleva al error y a tener que repetir la labor, con lo que aumenta la sobrecarga de trabajo...



La presión de tiempo como bucle de realimentación de refuerzo

Realimentación de compensación

Nada es eterno. Tarde o temprano aparece el segundo tipo de realimentación y frena el crecimiento. Este tipo se denomina *realimentación de compensación*; se opone al cambio. Se produce un bucle de realimentación de compensación cuando los cambios en una parte del sistema generan cambios en el resto del sistema que reducen, limitan o contrarrestan el cambio inicial. Son los bucles que presentan resistencia al cambio y mantienen estable el sistema; sin ellos la realimentación de refuerzo acabaría por romperlo.

En ocasiones se denomina «negativa» a la realimentación de compensación, pero se trata de una denominación confusa por dos motivos. En primer lugar, suele decirse que la crítica es la «realimentación negativa», y en segundo, la calificación de «negativa» sugiere que es perjudicial. La realimentación de com-

Ejemplos de realimentación de refuerzo

He aquí una lista de ejemplos de realimentación de refuerzo. Seguro que a usted se le ocurren muchos otros.

- espíritu de equipo
- cáncer
- paranoia
- ruido de realimentación de un amplificador
- crecimiento de las células vivas
- crecimiento de la población
- dividendos de una cuenta de ahorros
- deudas bancarias
- aprendizaje
- conocimiento
- poder
- rumores
- correspondencia en cadena
- confianza en uno mismo
- epidemias
- reacciones nucleares
- ataques de pánico
- arrecifes de coral
- recompensa

pensación no es en sí misma ni mala ni buena, indica simplemente que el sistema se resiste al cambio. Esto puede ser un obstáculo o una ventaja, depende de lo que queramos hacer. Si lo que queremos es cambiar un sistema complejo, la realimentación de compensación aparecerá como «resistencia». Si lo que queremos es mantener estable el sistema, aparecerá como «estabilidad».

En nuestro organismo hay innumerables bucles de realimentación de compensación. Por ejemplo, la temperatura del cuer-

po, que se mantiene estable. Una pequeña parte del cerebro denominada hipotálamo actúa como termostato del organismo. Cuando detecta una diferencia entre la temperatura que tenemos y la que deberíamos tener, activa los mecanismos que reducen esa diferencia. Gracias a otros bucles de refuerzo, el pulso, la presión arterial y la temperatura corporal se mantienen estables frente a los agentes externos; si no hubiera dependencia entre estos elementos, nos moriríamos.

Se establece un bucle de realimentación de compensación cuando surge alguna diferencia entre el estado del sistema en un momento dado y lo que el sistema necesita para equilibrarse. En este libro, utilizaremos el dibujo de una balanza para representar los bucles de realimentación de compensación:



La mayoría de los ejemplos que hemos mencionado en las páginas 57-64 son bucles de realimentación de refuerzo. La sed es una señal de que ha surgido una diferencia entre la necesidad de líquido del organismo y el líquido presente en un momento dado. Bebemos para reducir esa diferencia y volver a equilibrar el sistema. Al montar en bicicleta, cuando detectamos mediante la vista y los músculos que hay una diferencia demasiado grande entre donde estamos y donde queremos estar, movemos los brazos y las piernas para reducir esa diferencia.

La realimentación de compensación persigue un objetivo. Todos los sistemas tienen bucles de realimentación de compensación para mantenerse estables, por tanto, todos los sistemas tienen un objetivo, aunque sólo sea el de seguir como están.

La realimentación de compensación conduce el sistema hacia su objetivo. Una vez alcanzado, el bucle dejará de funcionar y el sistema se mantendrá en reposo o en estado de equilibrio.

La realimentación de compensación sirve también para reducir la diferencia entre dónde está un sistema y dónde «debería»

estar. Siempre que haya diferencia entre el estado actual del sistema y el estado deseado, la realimentación de compensación desplazará el sistema en la dirección del estado deseado. Cuanto más cerca del objetivo se encuentre el sistema, menor será la diferencia representada por la realimentación y menor será el desplazamiento del sistema.

En consecuencia, todo sistema necesita una forma de medición; de lo contrario, no habría manera de saber la diferencia entre dónde se está y dónde se debería estar. Todo sistema necesita medir esa diferencia con exactitud, si no se correría el riesgo de activar los bucles de realimentación cuando no fuera necesario. Por ejemplo, si el termómetro de un termostato da lecturas imprecisas en unos cuantos grados, la caldera se activaría con una temperatura errónea. En el salpicadero del coche de Joseph hay una serie de indicadores luminosos de advertencia. Hace unos meses, se encendió la luz del freno y en el manual decía que cuando ocurre eso significa que hay que revisar los frenos inmediatamente. Cuando Joseph llevó el coche al taller, resultó que los frenos funcionaban perfectamente y lo que se había estropeado era el mecanismo electrónico de medición; se había encendido el indicador de que los frenos estaban mal, y no era así.

Por otra parte, el sistema de medición debe medir con el grado de precisión apropiado para que el sistema funcione. Por ejemplo, si el termómetro de un termostato midiera los grados en centésimas, la caldera se encendería y se apagaría cada pocos minutos, ya que la temperatura cambia imperceptiblemente cada vez que una persona entra o sale de una habitación. Si, por el contrario, el termómetro registrara únicamente los aumentos de temperatura en cinco grados, pasariamos bastante frío hasta que llegara a encenderse la caldera. Todo sistema requiere una medición con el grado adecuado de precisión. En la comunicación, todos conocemos a personas cuya receptividad es tan tosca que, haciendo caso omiso de nuestros bostezos y expresiones de somnolencia, siguen enseñándonos el sexto álbum de las fotos que se hicieron el verano pasado. Hay también personas tan hipersensibles que se toman como un reproche cualquier observación o se ofenden porque dejemos de prestarles atención durante unos segundos.

La comunicación encierra siempre un objetivo, aun cuando no seamos conscientes de él; de lo contrario nuestros actos serían sencillamente aleatorios. En todos nuestros actos hay alguna finalidad, por muy trivial que sea, desde el micronivel de levantar un dedo al macronivel de planificar la vida. Puede que no seamos conscientes de nuestros objetivos, que los cambiemos o que no los alcancemos, pero están siempre ahí. Cualquier conversación tiene alguna finalidad, aunque sólo sea la de pasar el rato de forma agradable. Elegimos nuestras respuestas teniendo esto en mente. A veces tenemos una finalidad bien definida: venderle algo a alguien, convencerle de nuestro punto de vista o dejarle hacer lo que quiera. Elegimos nuestras palabras y nuestros actos en función de nuestra finalidad y la realimentación de la otra persona nos indica si vamos bien encaminados. Así, si lo que queremos es hacer una venta, por ejemplo, estaremos pendientes de las expresiones de interés de nuestro cliente, contestaremos a sus preguntas e intentaremos establecer con él una relación agradable.

Dado que este libro es una forma de comunicación, fue redactado en una tela de araña de bucles de realimentación de compensación. En primer lugar, hubo realimentación de compensación interna que fue modificando el libro durante el proceso de escritura. Después, fue revisado y reescrito varias veces para que resultara más claro, para que cada pasaje mantuviera con el resto una coherencia formal y de contenido. Las frases que está usted leyendo ahora no son las originales. Posteriormente, hubo realimentación de compensación externa por parte de terceras personas que leyeron el manuscrito y realizaron comentarios al respecto. Distintos amigos y colegas iban leyendo los borradores, comentándolos, señalando las partes positivas y sugiriendo ideas y mejoras que se introducían después en el siguiente borrador.

Llevar el inventario de un negocio también genera un bucle de realimentación de compensación. Debe haber suficiente mercancía almacenada para satisfacer la demanda y que los clientes no tengan que esperar, pero no tanta que ocupe demasiado espacio y haya que pagar mucho en gastos de almacenamiento. La

oferta y la demanda forman un bucle básico de realimentación de compensación en el conjunto de la economía. Cuando los bienes son escasos y la demanda es superior a la oferta, la realimentación reduce la demanda en dos sentidos: aumentando los precios o aumentando la oferta mediante las ventas y el marketing. Cuando la oferta es superior a la demanda, el bucle se activa y aumenta la demanda mediante la reducción de los precios o disminuye la oferta mediante la acumulación de reservas o las restricciones de fabricación.

Son muchos los bucles de realimentación de compensación que mantienen estable el medio ambiente. Cada ecosistema tiene su propio método natural de regulación, ya se trate de un bosque tropical, una pradera, un arrecife de coral o una marisma. Los animales, las plantas y todos los organismos de orden inferior están relacionados unos con otros mediante complejas interdependencias en forma de bucles de realimentación. Forman así una gran tela de araña en la que cada cual mantiene su propia existencia a través de las relaciones con los demás. Lo que pudiera parecer malo desde un solo punto de vista resulta en verdad necesario para mantener equilibrado el ecosistema. Por ejemplo, en las praderas son necesarios los incendios ocasionales. El fuego hace que germinen algunas semillas que, de otro modo, no lo harían, quema también la vegetación ya seca y en proceso de putrefacción, acaba con los retoños arbóreos e impide la entrada de especies vegetales intrusas que son menos tolerantes al fuego. A largo plazo, el fuego revitaliza las praderas. Parece que los ecosistemas necesitan una contienda para hacerse más fuertes.

También entre los animales hacen falta los depredadores para que el número de individuos de las distintas especies se mantenga estable. Los depredadores y sus presas forman un bucle de realimentación de compensación. Por ejemplo, los lobos canadienses cazan alces, ciervos y caribús. En un invierno templado, con alimento suficiente, aumenta la población de ciervos. Sin embargo, su hábitat no puede soportar este aumento y, al cabo de los días, los ciervos empiezan a agotar sus fuentes de alimento. A medida que la población aumenta, empieza a

haber también cada vez más ciervos viejos y enfermos. Esto es una buena señal para los lobos. Los ciervos son abundantes y fáciles de cazar, así que durante un tiempo los lobos se alimentan bien y engordan. Esto reduce el número de ciervos y acaban quedando únicamente los más rápidos y sanos. Entonces se invierten las tornas, cada vez es más difícil para los lobos encontrar presas; al poco tiempo, los lobos viejos y enfermos empiezan a morirse, y se reduce la presión sobre los ciervos. Las fuentes de alimento del hábitat vuelven a regenerarse y el ciclo comienza de nuevo. Cuantos más ciervos, más lobos; a continuación, menos ciervos, en consecuencia menos lobos, y entonces más ciervos... Los lobos sirven para que la población de ciervos se mantenga en los niveles que el ecosistema puede soportar y después los ciervos les devuelven el favor a los lobos. Ese es el «objetivo» de este particular sistema, aunque no coincide con el objetivo de un ciervo aislado ni de un lobo, en caso de que llegaran a planteárselo. Resulta cruel para cada individuo por separado, pero mantiene el equilibrio global de la naturaleza, de suerte que las dos especies consiguen sobrevivir.

Si se altera el equilibrio natural, se genera un perjuicio tanto para los depredadores como para sus presas. Por ejemplo, en la llanura de Kaibab, en Arizona, pueden vivir hasta 40.000 ciervos. En cierta ocasión, los cazadores con licencia dieron buena cuenta de los depredadores naturales del ciervo (lobos, pumas y coyotes) y la población llegó a superar los 50.000 individuos. No había suficiente alimento para todos. En su desesperación, los ciervos devoraron toda la comida disponible, llegando incluso a roer la corteza de los árboles. Cuando ya no quedó nada, 40.000 ciervos murieron de hambre.

Tal vez la enfermedad sea otro ejemplo de realimentación de compensación. Cuando estamos cansados o sobrecargados de trabajo, tenemos más probabilidades de caer enfermos; entonces nos vemos obligados a descansar unos días, recuperamos las fuerzas y seguimos adelante. El estrés, que está demostrado que nos hace más propensos a caer enfermos, es una de las formas que tiene el organismo para indicar la diferencia entre su objetivo –nuestro bienestar– y el estado en que nos encontramos. La

enfermedad nos obliga a descansar unos días para después reanudar nuestras ocupaciones con más bríos. Por tanto, ciertas enfermedades son una clase (no deseada) de realimentación de compensación.

La curación es otro ejemplo de realimentación de compensación. El cuerpo detecta una diferencia entre cómo se encuentra y cómo debería encontrarse, y actúa en consecuencia para reducir esa diferencia, ya sea mediante la coagulación de la sangre para cerrar y cicatrizar una herida o mediante la activación del sistema inmunitario para defendernos del antígeno que nos ataca.

Sin los bucles de realimentación de compensación los seres vivos no podríamos sobrevivir ni funcionarían las sociedades ni los ecosistemas. Son el pegamento que impide que nos rompamos en pedazos.



Ejemplos de realimentación de compensación

He aquí una lista de bucles de realimentación de compensación. Algunos son muy complejos, formados por muchos subsistemas, pero todos funcionan como bucles de realimentación de compensación. ¿Se le ocurre alguno más?

Sistemas mecánicos

- el cambio de marchas en un coche automático
- el regulador de una máquina de vapor
- el aire acondicionado

Sistemas humanos

- la temperatura corporal
- el hambre
- la sed

- el dolor
- el nivel de azúcar en sangre
- la presión sanguínea
- la respiración
- la enfermedad
- la tos
- el sueño
- los procesos de curación
- escribir
- pintar
- conducir un coche
- montar en bicicleta
- cualquier acción que conlleve la consecución de un objetivo
- cualquier otra función vital

Ecosistemas

- depredadores y presas
- equilibrio entre alimento y población

Sistemas sociales

- elecciones
- oferta y demanda del mercado
- impuestos

Negocios

- atención al cliente
- liderazgo
- gestión de inventario
- ventas
- previsiones
- creación de equipos
- estrategias de marketing

Proalimentación: regreso al futuro

La mayoría de las veces, la realimentación genera cadenas de causa y efecto en las que cada acción influye en la siguiente. Por ejemplo, la sed nos hace beber, y beber hace que sintamos menos sed. En la comunicación, lo que decimos genera la respuesta del que nos escucha, y su respuesta da lugar a la nuestra. Un descenso de la temperatura hace que el termostato active la caldera, lo cual lleva a un aumento de la temperatura, que hace que el termostato desactive la caldera. Así, las causas y los efectos forman círculos, y lo que era la causa desde un punto de vista se convierte en el efecto desde el otro. La causa del presente da lugar al efecto del futuro.

La *proalimentación* describe un curioso efecto, ligeramente distinto, de algunos tipos de realimentación: cuando el efecto anticipado del futuro, que todavía no ha tenido lugar, genera la causa del presente que, de no ser así, no se hubiera producido. Por ejemplo, cuando pensamos que vamos a fallar en algo, lo más habitual es que fallemos. Después de todo, ¿para qué intentarlo si es una empresa fallida? No cabe duda de que ser supersticioso trae mala suerte. En cambio, cuando tenemos la esperanza de que vamos a superar algo, nuestra energía y optimismo se ponen a nuestro favor y hay más probabilidades de que lo logremos. Habremos puesto parte de nuestra parte.

Nuestras esperanzas, nuestros miedos y nuestras convicciones respecto al futuro nos sirven para crear el propio futuro que anticipamos. Así, la mejor forma de pasar un día aburrido es convencerse de antemano, esperar lo peor y hacer premoniciones negativas al respecto. Después, como ya «sabemos» que va a ser aburrido, estaremos desorientados, pasaremos rápidamente de una actividad a otra para acabar cuanto antes y volver a casa. Si además no dejamos de comparar lo que nos ocurre con otro tiempo en que las cosas eran mucho mejores, seguro que el día acabará cumpliendo nuestras expectativas. Para pasar un buen día, hay que hacer exactamente lo contrario: anticipar el gran placer que vamos a sentir, pensar en todas las cosas interesantes

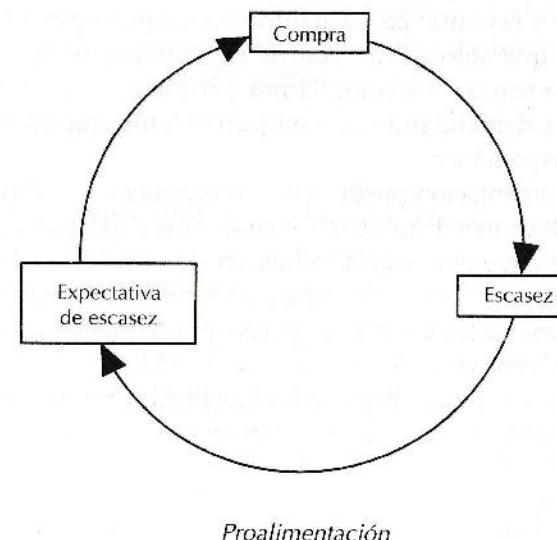
que podremos hacer, dejar que su importancia y colorido aumenten en nuestra imaginación. Entregarnos por completo en cada actividad. A veces todo termina en una sorpresa de alegría (o de decepción), pero por regla general el tener expectativas respecto a un hecho hace que se produzca tal como lo esperamos.

La proalimentación crea premoniciones que se cumplen. En el mercado de valores, el equivalente a «tienes que poner parte de tu parte» es el dicho de «dinero llama dinero». Corren rumores de que va a subir el valor de unas acciones. Antes de que las acciones hayan subido, los rumores atraen a los compradores y entonces las acciones empiezan a subir. Cuanto más suben, más compradores atraen. Ya se ha creado un bucle de refuerzo. Finalmente, los comentaristas del mercado de valores generan un bucle de compensación diciendo que las acciones están supervvaloradas, los accionistas empiezan a vender y los precios caen.

Las previsiones sobre la escasez de cualquier tipo de producto funcionan de la misma manera. ¿Qué hace la gente cuando se anuncia que va a escasear algo? Sale a la calle y compra la mercancía de que se trate «por si acaso». Incluso se compra más de lo habitual para prevenirse de la escasez prevista, de manera que se crea así la escasez que ha causado la alarma. Cuando en Gran Bretaña los panaderos se pusieron en huelga hace unos años, las panaderías independientes vendieron rápidamente el poco pan que hicieron a personas que llevaban hasta tres horas haciendo cola. Cuando hubo problemas de suministro en las gasolineras, vimos el ridículo espectáculo de los coches en cola durante horas para llenar los depósitos «por si acaso», por si no podían llenarlos nunca más. Este comportamiento creó una escasez mucho más grave. El suministro continuo y regular de gasolina no está pensado para que todos los vehículos tengan el depósito lleno al mismo tiempo. Podríamos generar una crisis si todos llenáramos el depósito de nuestro coche hoy al mediodía. Las fuentes de suministro se agotarían y habría déficit de combustible hasta que el sistema estuviera preparado para responder a la nueva demanda.

El dinero es otro ejemplo. Si todos sacáramos a la vez el dinero de nuestras cuentas, el sistema financiero se vendría abajo. Si se dispara el rumor de que un banco no tiene dinero suficiente para afrontar sus deudas, los titulares de las cuentas correrían en masa a la entidad a sacar su dinero. El banco no tendría entonces dinero suficiente para pagar a todos, surgiría el pánico y el rumor llegaría a hacerse realidad. ¿Cuál es la causa y cuál es el efecto? Una pregunta imposible mientras pensemos en las causas y los efectos como cosas distintas y aisladas.

Un rumor puede ser totalmente infundado, una profecía puede ser una falacia y el profeta un charlatán, pero las predicciones pueden llegar a hacerse realidad, no porque sean previsiones razonables respecto al futuro, sino porque el solo hecho de haberlas formulado modifica el futuro. Lo importante es que las personas *crean* en la profecía y *actúen* en consecuencia. Nuestras creencias conforman el futuro.



A veces la proalimentación tiene otra peculiaridad. Los propios esfuerzos que hace una persona para evitar algo acaban haciendo que eso ocurra. Es como andar de espaldas hacia el agujero que uno intenta esquivar. Joseph conoce a varias personas que se han lesionado jugando a squash porque la posibilidad de lesionarse les creaba mucha ansiedad. Se sentían inseguros por haberse lesionado en el pasado, y entonces alguna mala postura en el saque les llevaba a volver a lesionarse.

En el ámbito social ocurre que cuando una persona tiene muchas ganas de tener amigos y pretende hacerse amiga de todo el que conoce, acaba siendo rechazada, porque sus esfuerzos tienen algo de desesperados, de ansiosos, y generan más distanciamiento que atracción.

El insomnio es un ejemplo algo distinto. Supongamos que nos preocupa no poder dormir. Entonces, «intentamos» dormir, pero cuanto más lo intentamos, más difícil nos resulta. Y cuanto más nos cuesta, más nos empeñamos en conseguirlo. El empeño es lo que nos impide dormir y refuerza la idea de que nos va a costar trabajo dormir. Al final, la única manera de dormirnos es dejar de empeñarnos en conseguirlo.

En este tipo de proalimentación reside la explicación de la paradoja «sé espontáneo». Cuanto más empeño ponemos en hacer algo que sólo puede ocurrir espontáneamente, menos espontáneos somos. Podemos liarnos y liar a otros en conflictos irresolubles demandando un comportamiento que sólo tiene valor si es espontáneo.

La proalimentación puede llevar en ocasiones a predicciones contraproducentes. Esto ocurre cuando una expectativa o predicción de lo que va a ocurrir influye en el presente de tal manera que impide que llegue a darse en el futuro. Por ejemplo, decir a determinados atletas que van a perder puede producir el efecto contrario. Cuanto más se les dice, más se afianzan ellos en que van a ganar, y entonces llegan a la competición con una energía y una determinación tales que consiguen ganar.

Resumen de la realimentación y la proalimentación

- La *realimentación de refuerzo* se da cuando los cambios del sistema vuelven hacia atrás y amplifican el cambio original. Dicho de otro modo: el «efecto» del cambio refuerza la «causa» y amplifica el cambio. El sistema se desplaza cada vez más rápidamente del punto en el que se encontraba inicialmente.
- Esto puede dar origen a la *proalimentación de refuerzo*, cuando una predicción o anticipación de un cambio aparta el sistema del estado predicho, es decir, se produce una profecía contraproducente.
- La *realimentación de compensación* se produce cuando los cambios del sistema vuelven hacia atrás para oponerse al cambio original, de forma que amortiguan el «efecto». Dicho de otro modo: El «efecto» del cambio se opone a la «causa» del cambio. El sistema se estabiliza acercándose a un estado determinado: su objetivo.
- La *proalimentación de compensación* se da cuando la predicción o anticipación de un cambio conduce el sistema hacia el estado predicho. Se trata en este caso de las predicciones que se cumplen.

Cuando no aprendemos de la experiencia

Aprendemos de la experiencia estableciendo una conexión entre causa y efecto. Poner la mano en un infiernillo nos da una realimentación inmediata llamada dolor, y rompemos rápidamente el círculo apartando la mano. Aprendemos que tocar un infiernillo da dolor, y generalizamos que cualquier cosa caliente nos hará daño, no sólo los infiernillos. Pero supongamos que el dolor y la ampolla aparecieran dos días más tarde o una semana o un mes. ¿Sería igual de fácil aprender que hay que quitar la mano del

infiernillo? Las alergias a determinados alimentos son muy difíciles de detectar justamente porque no siempre se producen después de comer el alimento que las genera. Las agujetas suelen aparecer uno o dos días después de haber hecho el ejercicio físico que las origina. Los efectos secundarios de un fármaco pueden manifestarse meses o incluso años después de la ingesta. Las campañas publicitarias tardan semanas en modificar los hábitos de compra de los clientes. Intentamos educar a nuestros hijos lo mejor que podemos, pero no tenemos una idea exacta de cómo habrán influido nuestras acciones cuando sean mayores.

La otra parte del aprendizaje a partir de la experiencia es dónde se produce la realimentación. Puede ser inmediata, pero si hacemos algo aquí y el efecto es en la puerta de enfrente, difícil será extraer algún aprendizaje. Si el departamento de ventas de una empresa ofrece gratis la asistencia técnica para promocionar las ventas, el departamento de servicio técnico sufrirá un perjuicio, pero la realimentación al departamento de ventas puede ser muy favorable. El departamento de servicio técnico, sobrecargado, tal vez no tenga una impresión tan buena.

La realimentación es un círculo, y lleva su tiempo recorrerlo entero. Esto significa que los efectos pueden aparecer tiempo después de la causa. Es lo mismo que ocurre cuando miramos a las estrellas. Dado que las estrellas están a distancias muy remotas, la luz tarda años en llegar a nosotros. Incluso la luz de la estrella más cercana, el Sol, tarda nueve minutos en llegar hasta nosotros. Si miramos una estrella esta noche, no la veremos como es ahora, sino como era hace muchos años. En cierto modo, estamos viendo al pasado.

Pensemos en el apetito como parte de un bucle de realimentación. La realimentación no es tan inmediata como cuando tenemos sed. Es raro (e incómodo) beber demasiado líquido, ya que sentimos el efecto sobre nuestra sed de forma inmediata. Sin embargo, transcurre cierto tiempo entre el momento en que llenamos el estómago y aquel en que nos sentimos satisfechos. Cuando digerimos la comida, los azúcares pasan del estómago a la sangre y activan la liberación de una sustancia neurotransmisora llamada serotonina cuando llegan al cerebro. La serotonina

estimula otra parte del cerebro que envía el mensaje de que estamos llenos. Este proceso lleva su tiempo, de tal modo que la sensación de estar lleno no se relaciona directamente con la cantidad de comida que haya en el estómago en ese momento, sino con la que había hace unos minutos. Esta diferencia de tiempo entre el estar lleno y el sentirse lleno supone que podemos seguir comiendo y pasar del estado de satisfacción al de ahítos. Si seguimos comiendo cuando ya nos sentimos llenos, habremos ido demasiado lejos. La forma de evitarlo es comer más despacio, masticando bien los alimentos para acelerar la asimilación de azúcares. Tenemos que darnos el tiempo suficiente para que aparezca la realimentación.

Cuando no tenemos en cuenta los desfases de tiempo evaluamos demasiado pronto el éxito de nuestras estrategias, sin comprobar todas sus consecuencias. Así, seguimos utilizando una estrategia pensando que es eficaz y no la conectamos con las consecuencias reales que produce, con lo cual suponemos que se deben a otros factores.

El ejemplo más claro de los períodos de desfase es el de los efectos de los productos químicos sobre el medio ambiente. Los primeros informes científicos en los que se sugería que los compuestos clorofluorcarbonados (CFC) destruían la capa de ozono se publicaron en 1974. Hasta 1985 no hubo pruebas claras de un profundo agujero en la capa de ozono sobre la Antártida. Desde que se libera en la superficie de la Tierra una molécula de CFC hasta que llega a la alta estratosfera y destruye la capa protectora de ozono pasan quince años. Las mediciones realizadas en 1985 mostraban los efectos de los CFC liberados en 1970. En 1990, se reunieron en Londres los representantes de 92 países y decidieron reducir progresivamente la producción de CFC hasta acabar con ella en el año 2000; aun así, todos los CFC presentes hoy en la estratosfera tardarán más de un siglo en desaparecer.

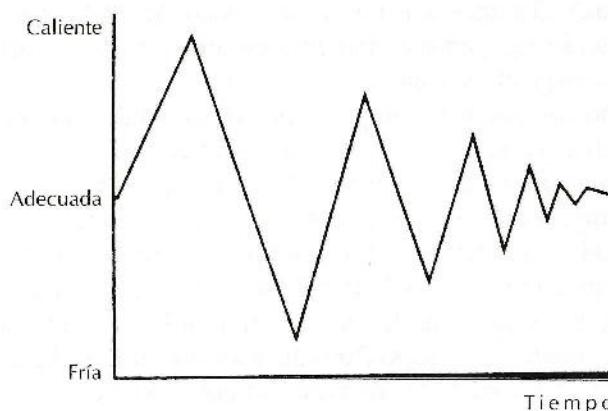
Así pues, aprendemos de la realimentación que conecta claramente el efecto con su causa. Cuando hay una diferencia de tiempo grande, creemos que no hay ningún efecto y no aprendemos nada.

Cuanto mayor es la complejidad dinámica de un sistema, más tiempo tardará la realimentación en recorrer la red entera de conexiones. Algunas conexiones pueden ser muy rápidas, pero puede que una sola conexión lentifique todo el sistema. Un solo atasco puede hacer que lleguemos tarde aun cuando hagamos con fluidez el resto del trayecto. La velocidad de un sistema se determina por su punto más lento. Esto es algo que a veces no se tiene en cuenta en las empresas. Es posible que se automaticen muchos procesos y que la producción global no llegue a hacerse con más rapidez porque no se haya cambiado la causa real de los retrasos.

El tiempo que tarda la realimentación en recorrer todo el sistema y volver a nosotros es la «memoria» del sistema. Es ese intervalo que no percibimos entre causa y efecto y que nos lleva a creer que no está pasando nada. Por ejemplo, hubo un tiempo en que aprendimos a leer, pero cada vez que leemos es como si ese aprendizaje apareciera de repente. ¿Dónde se va la capacidad de lectura cuando no estamos leyendo? La memoria no es un lugar real; es muy difícil señalar un lugar del cerebro y decir: «Aquí es donde se ha almacenado determinada información». Es posible acceder a determinados recuerdos mediante la estimulación de determinadas partes del cerebro, pero eso no quiere decir que estén almacenados ahí. Sabemos que hemos recordado algo cuando lo utilizamos tiempo después. Hasta ese momento, es invisible, se mantiene de alguna forma en el cerebro mediante la interconexión de las neuronas.

Cuando hay un desfase entre causa y efecto y pensamos que no ha habido ningún efecto, solemos llevarnos una gran sorpresa cuando de repente aparece el efecto. Y el efecto durará tanto como la causa que le dio origen. Imaginemos una manguera muy larga conectada a un grifo en uno de sus extremos. Abrimos el grifo y miramos al otro extremo de la manguera; no pasa nada. Entonces abrimos más el grifo. El agua empieza a salir por el otro extremo de la manguera, cada vez con más fuerza, aunque cerremos el grifo inmediatamente. La manguera soltará toda el agua que se haya acumulado mientras el grifo estuvo abierto, y no importa que ya hayamos cerrado el grifo. La manguera es el sistema y «recuerda» lo hecho previamente.

Este periodo de tiempo, el desfase, nos puede volver locos cuando intentamos ajustar el efecto y lo hacemos demasiado tarde o con demasiada intensidad. ¿No ha experimentado nunca el martirio de helarse y abrasarse con una ducha ingrata? Nada más despertarnos, abrimos el grifo y nos metemos torpemente en la ducha. El agua está demasiado caliente. Abrimos un poco el agua fría, pero sigue estando que abrasa. Abrimos más el grifo de agua fría, entonces el agua se pone helada. Rápidamente le damos otra vez al grifo de agua caliente, y a los pocos segundos volvemos a abrasarnos. Este efecto podría representarse como en el siguiente gráfico:



El martirio de helarse y abrasarse

Este es un patrón clásico; se da en las subidas y bajadas del mercado, en los períodos de inflación y deflación. Siempre que encontramos en nuestras vidas un patrón de estas características, podemos estar seguros de que está originado por un bucle de realimentación de compensación con un periodo de desfase. Un ejemplo lo tendríamos cuando disponemos de dinero y lo gastamos sin pensar; de pronto nos damos cuenta de que nos estamos quedando sin y empezamos a controlar en qué lo gastamos. El mismo patrón se reproduce en la marcha de muchos negocios.

Durante un trimestre el dinero fluye libremente; de pronto se desencadena una crisis. En un momento dado faltan existencias para hacer frente a los pedidos y a las pocas semanas o a los pocos meses el almacén está repleto porque ha bajado la demanda.

Hay dos soluciones. Una consiste en obtener mediciones más fiables que nos den una realimentación inmediata (cambiar la instalación de la ducha para que no haya tanto desfase). Si esta solución falla, será preciso tener en cuenta el periodo de desfase al hacer los ajustes necesarios, de forma que el cambio se produzca cuando queremos que se produzca, después de recorrer el sistema (abrimos el grifo sólo un poco y esperamos hasta ver el efecto. Con todo, esta opción, a la larga, suele resultar incómoda). El punto más importante es cuando sabemos *cómo* está pasando algo; en ese momento estamos en mejor posición para hacer algo al respecto.

En un sistema muy complejo, un efecto puede manifestarse mucho tiempo después de la causa que lo originó. Es probable que para cuando seamos capaces de ver el efecto, haya alcanzado un umbral crítico y sea demasiado tarde para anularlo. En el efecto de los productos químicos sobre el medio ambiente se ve claramente este riesgo. El PCB (bifenilo policlorado) es una sustancia química que se utiliza en todo el mundo en la fabricación de componentes eléctricos. Durante cuarenta años, se ha estado vertiendo PCB a las redes de alcantarillado y en vertederos sin pensar en las consecuencias a largo plazo. En un estudio de 1966, que se realizó para detectar el pesticida DDT en el medio ambiente, se descubrió una gran presencia de PCB. El bifenilo policlorado se desplaza muy lentamente a través del suelo hasta las aguas subterráneas. A corto plazo, parece que no causa ningún daño. Sin embargo, el medio ambiente lo guarda en su «memoria». El PCB es soluble en las grasas, llega a la carne de los animales y allí se acumula. Esta sustancia se va concentrando cada vez más, a medida que avanza en la cadena alimentaria, y se ha descubierto que su concentración es mayor en aves marinas y en la leche de los mamíferos, incluso en la humana. El PCB altera el sistema inmunitario de los seres humanos y las funciones reproductoras. Desde la década de 1970 su producción está

prohibida en la mayoría de los países. No obstante, un 70 por ciento del PCB producido previamente sigue presente en el material eléctrico. El otro 30 por ciento ha sido liberado al medio ambiente. De momento, sólo el 1 por ciento ha llegado a los mares, donde es posible medirlo y ya ha tenido un efecto sobre la vida marina. El 29 por ciento restante, todavía en la tierra, los lagos y los ríos, seguirá siendo un riesgo para los seres vivos durante decenios o incluso cientos de años.

Cuando se manejan sistemas hay que tener en cuenta los retrasos de tiempo. El resultado de los cambios no tiene por qué ser inmediato.

Lo que hacemos en el presente afectará nuestras vidas en el futuro, cuando se manifiesten las consecuencias. Si no podemos ver la relación, puede que echemos la culpa a la situación presente, cuando en realidad las raíces se encuentren en nuestras acciones pasadas. Lo que hacemos hoy conforma nuestro futuro.

Respuestas a los acertijos sobre el crecimiento exponencial

- ① Si pudiéramos doblar el mismo papel otras cuarenta veces, llegaría hasta la luna.
- ② Más vale que nos demos prisa, porque mañana habrá cubierto el estanque entero.
- ③ No fue nada acertada. En el cuadrado veintiuno ya se habría acumulado un millón de granos de arroz, y no hay arroz suficiente en el mundo para pagar la deuda en el cuadrado sesenta y cuatro. Jaque mate.