

REALIMENTACIÓN

Prediction is difficult, especially about the future
 NIELS BOHR

La complejidad nace únicamente de la interacción entre objetos. Si no hay objetos, o si los hay pero no interactúan entre sí, entonces todo es sencillo y predecible. No hay complejidad. Lo que ocurre es la superposición (suma) de todo lo que hace cada uno de los objetos y, en ese caso, se hace posible calcular promedios y desviaciones típicas, esto es, entender el fenómeno por medio de estadísticas.

Para lograr complejidad necesitamos interacciones entre objetos, lo cual se modela de varias formas (por ejemplo, con grafos), pero aquí hemos elegido otra que nos va a servir para entender lo que viene después. Esa forma como nace la complejidad es la realimentación de procesos.



Figura 2. Sistema sin realimentación

Los sistemas sencillos son procesos resumidos en una función de transferencia, que transforman entradas en salidas (Figura 2). La función de transferencia puede ser lineal o no lineal. En cualquier caso, estos sistemas se comportan de una manera simple y, por tanto, fácil de predecir. Un ejemplo de ello puede ser... *ejem...* puede ser... la verdad es que casi no existen los

sistemas lineales. Pero imaginemos una bicicleta de piñón fijo (en la que puedes pedalear hacia atrás). En ella, el número de pedaleadas que des (entrada) se traduce al número de metros que recorres (salida) y la relación entre uno y otro es una constante que viene dada por la geometría de los engranajes (radios de los pedales, rueda y piñón). Esa bicicleta es un sistema lineal.

Los sistemas lineales se definen matemáticamente como aquellos donde hay superposición de soluciones, es decir, donde

$$\begin{aligned} f(x+y) &= f(x)+f(y) \\ f(Kx) &= Kf(x) \end{aligned} \tag{Ec. 1}$$

Siendo x,y entradas del sistema, $f()$ la función de transferencia y K una constante, que también es equivalente a

$$f(K_1 x+K_2 y)=K_1 f(x)+K_2 f(y) \tag{Ec. 2}$$

Siendo K_1 y K_2 constantes.

La primera línea de la ecuación 1 nos dice que, si tenemos dos entradas, la salida de la suma de las entradas es igual a la suma de las salidas producidas por cada entrada por separado. Y la segunda línea nos dice que la salida de un múltiplo de la entrada es igual al mismo múltiplo de la salida producida por esa entrada.

Esto es muy útil en ingeniería porque si un sistema es lineal podemos analizarlo en varios casos particulares, o sea, varias entradas, y si superponemos entradas, obtendremos superposición de salidas.

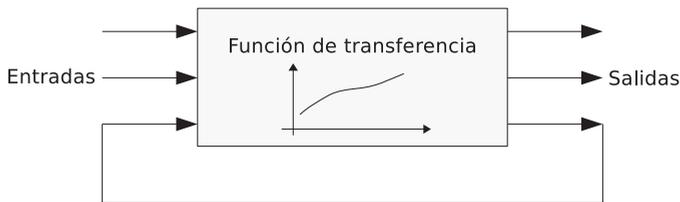


Figura 3. Sistema con realimentación

Un caso especial ocurre cuando a uno de estos sistemas se le conecta alguna salida con alguna entrada (Figura 3) y entonces ya con ello tenemos una realimentación. La salida que creíamos fácilmente calculable ahora va a cambiar una de las entradas, que a su vez va a afectar a la salida, que cambiará la entrada, y así sucesivamente. Las cosas ya no son tan sencillas, ni desde una perspectiva intuitiva ni formal. El análisis de sistemas realimentados es

una de las áreas más difíciles de la ingeniería, como puede verse en Phillips y Harbor (1988) o en Zilouchian y Jamshidi (2001).

La verdad es que es raro encontrar sistemas sin realimentación. Iba a proponer como ejemplo una nevera donde girando un dial seleccionas la temperatura que deseas (entrada) y como salida obtienes esa temperatura en el interior de la nevera. La función de transferencia convierte grados geométricos del dial en grados centígrados dentro de la nevera. Pero ello no es del todo cierto, pues resulta que las neveras modernas tienen internamente un control de temperatura, que es una realimentación negativa, con el que logran mantener la temperatura deseada independientemente de si se abre la puerta o si se colocan alimentos calientes dentro.

Iba también a proponer el ejemplo de un automóvil con los pedales de aceleración y freno y con el timón como entradas, siendo la salida su posición. Si el automóvil estuviera suspendido en el aire, podría valer como ejemplo, pero una vez que las ruedas tocan tierra, el espacio que recorre es una especie de acumulador de velocidad, es decir una memoria. No es lo mismo girar a la derecha en un punto de la ciudad que en otro (puede haber una dirección prohibida, una pared o una obra). La consecuencia de las acciones que tomas ahora dependen de la secuencia de acciones pasadas. Definitivamente un automóvil recorriendo una ciudad tiene memoria y, por tanto, hay una realimentación (Figura 4).



Figura 4. Cualquier objeto físico recuerda su posición, lo cual es un tipo de realimentación

Incluso muchos fenómenos de la física que nos enseñan que son simples, realmente tienen algún tipo de realimentación. Por ejemplo, el movimiento del péndulo de longitud l , sigue la conocida ecuación

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{g}{l} \sin \alpha = 0 \quad \text{Ec. 3}$$

Que me dice cómo varía el ángulo de desviación α respecto a la vertical sabiendo la aceleración de la gravedad g . Después se suele decir que para pequeños valores de α es posible aproximar $\sin(\alpha) \approx \alpha$ y entonces obtenemos la

solución, que corresponde a una oscilación sinusoidal. La ecuación 3 obviamente no es lineal, pero tampoco es exacta como nos suelen decir. Y ello es debido a una realimentación ya que g no es constante. Dado que el péndulo oscila, en los puntos más altos de su movimiento se encuentra más alejado de la Tierra, por lo que g es menor. El efecto es muy pequeño, claro, pero existe. Y es una realimentación porque la aceleración gravitatoria g hace que el péndulo oscile, y la oscilación del péndulo hace que cambie el valor de la aceleración gravitatoria.

A su vez, hay dos tipos de bucles: de realimentación negativa y de realimentación positiva. Veamos ejemplos y características de cada uno.

REALIMENTACIÓN NEGATIVA

La realimentación negativa se usa cuando se desea mantener estable la salida de un sistema, incluso frente a perturbaciones externas. Algunos ejemplos de ello son el control de la altura de un avión, el control de velocidad de crucero de un automóvil automático y el control de temperatura de un horno para hacer pan. Si hay una turbulencia que empuja el avión hacia abajo, veremos que la realimentación negativa se encarga de volverlo a llevar a la altura deseada. Si el automóvil comienza a subir una carretera muy empinada —con lo que de forma natural se reduce su velocidad—, el control de crucero lo volverá a llevar a la velocidad seleccionada. Si abrimos la puerta del horno para introducir pan y se nos escapa aire caliente entrando aire frío, la realimentación negativa del control del horno volverá a estabilizar la temperatura en el valor correcto para hacer el pan sin que quede crudo ni se queme.

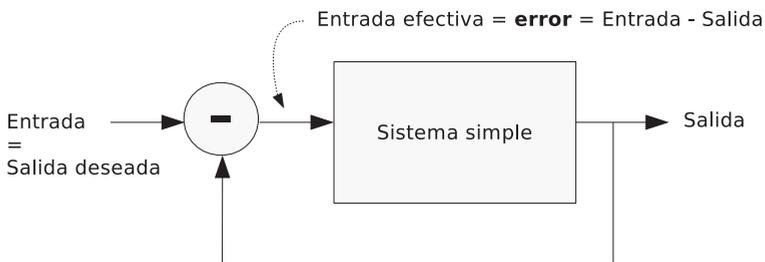


Figura 5. Realimentación negativa

Para lograr realimentación negativa, la variable de salida se vuelve a inyectar a la entrada de modo que se oponga a los cambios en la salida. Esto se puede realizar de varias formas, pero la más sencilla de entender es la de la figura 5, donde simplemente la entrada se resta de la salida y esa es la nueva entrada al sistema.

Para ver cómo funciona, lo habitual es considerar la entrada como la salida deseada. En el ejemplo del horno de la figura 6, tengo un dial donde selecciono la temperatura que deseo. Por ejemplo, supongamos que es 250 grados centígrados. Esa es la “salida deseada” del horno. La salida real (o, simplemente, salida) del horno, dado que lo acabo de conectar, será la temperatura ambiente, por ejemplo 27 grados centígrados. Entonces el sistema resta la salida deseada menos la salida, lo cual da $250-27=223$. Ese número 223 es la potencia calorífica que se inyecta al horno. Como es mucha, el horno se calentará rápidamente. Pero conforme la temperatura de salida aumenta, el resultado de la resta disminuye, y la potencia que se inyecta al horno también lo hace. Esto ocurre hasta el momento en que la salida coincide con la salida deseada, donde la potencia aplicada será $250-250=0$. Es justo lo que necesitamos: cuando la salida ha alcanzado la temperatura deseada, ya no hay que inyectar más calor al horno.

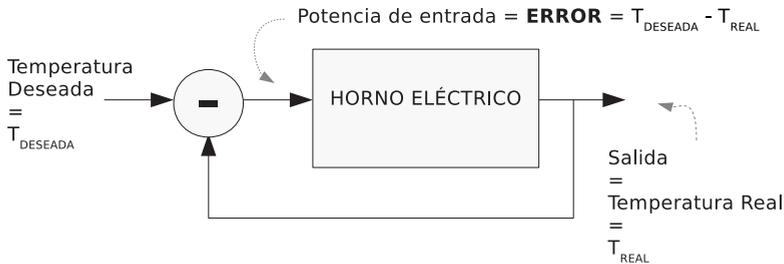


Figura 6. Horno con realimentación negativa

En la práctica, y dependiendo de la ganancia y de los retrasos (lo que demora la potencia calorífica de entrada en lograr un aumento de temperatura), puede que la estabilización de la salida ocurra demasiado tarde, es decir, se acerque asintóticamente al valor deseado, pero solo se alcance cuando pase infinito tiempo (Figura 7-a). Para evitarlo existen varias técnicas, pero la más sencilla es aumentar la ganancia. Con ello se aplicará más calor del necesario y el horno alcanzará rápidamente la temperatura deseada. Pero a cambio —debido a los retrasos (las inercias térmicas)— esa temperatura deseada será superada. Por ejemplo, supongamos que la salida llega a 270. Entonces ahora la entrada valdrá $250-270=-20$. La entrada es negativa y eso significa que el circuito de control extraerá 20 unidades de calor del horno empleando, por ejemplo, ventiladores. De este modo la temperatura comenzará a bajar hasta que la salida coincida con la temperatura deseada. En ese momento se le aplicará una potencia de $250-250=0$. Y como hemos dicho que la ganancia es más alta de lo debido, ocurrirá ahora el mismo fenómeno pero hacia abajo: debido a las inercias térmicas, el horno bajará su tempera-

tura un poco más de lo esperado, digamos a 247, con lo cual la entrada será $250-247=3$ de potencia calorífica. Y así seguirá, ajustándose poco a poco. Al final, la temperatura se estabilizará en el valor deseado. A este fenómeno de sobrepasar hacia arriba y hacia abajo el valor deseado se le llama *ringing*, rizado o sobreoscilación (Figura 7-b).

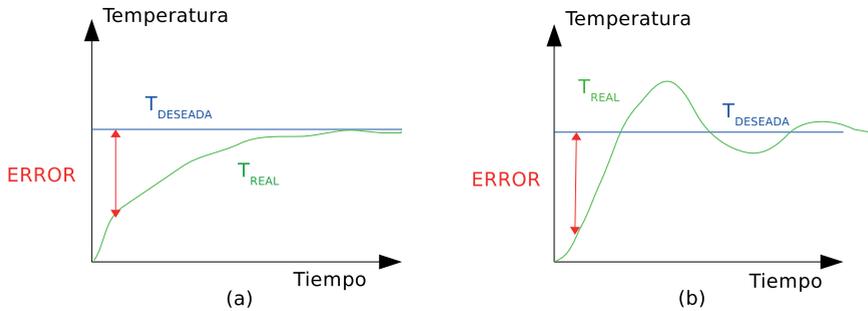


Figura 7. Evolución en el tiempo de una realimentación negativa (a) subamortiguada y (b) sobreamortiguada

Mediante el uso de técnicas adecuadas (como poner circuitos de control que compensen las inercias térmicas del horno) se puede reducir la sobreoscilación al mínimo⁴.

La realimentación negativa se usa mucho en ingeniería porque sirve para:

- Estabilizar un sistema.
- Hacer robusto un sistema frente a diversas formas de funcionamiento, ruidos o perturbaciones externas.
- Controlar un sistema para que se comporte como uno desee.

Otros ejemplos cotidianos donde se usa la realimentación negativa son:

- Conducir un automóvil mirando de frente y a los lados. Lo hacemos todos los días: si me aproximo mucho a un lado, giro el timón en dirección contraria, y eso es una realimentación negativa que sirve para estabilizar el automóvil en el centro de la carretera.
- El tanque del agua en el inodoro. Su nivel de agua se mantiene constante gracias a un flotador conectado a una válvula de paso del agua. Cuando hay poca agua, el flotador está muy abajo y eso hace que la válvula de agua se abra completamente para llenar el tanque. Conforme el nivel

⁴ Hay otras técnicas de control donde se evitan estos problemas (como el control predictivo), pero no son objetivo de este libro. La técnica explicada aquí, el control PID, es suficiente para ilustrar lo que significa un bucle de realimentación negativa.

de agua sube, empuja el flotador hacia arriba que, a su vez, va cerrando la válvula porque ya no se requiere tanto flujo de entrada. Al llegar a un cierto nivel prefijado, el flotador cierra la válvula por completo y deja de entrar agua. El tanque está lleno. El objetivo de este mecanismo es mantener el tanque lleno incluso cuando haya perturbaciones externas (cuando vaciamos el inodoro). El perfil en el tiempo para lograr anular la perturbación es el de la figura 7-a.

- Prácticamente en todos los sistemas metabólicos de los cuerpos vivos, como el control del azúcar, del pH o del oxígeno en la sangre. Por ejemplo, al comer el nivel de azúcar aumenta y entonces el páncreas libera insulina en el torrente sanguíneo que captura el azúcar y lo lleva al interior de las células donde se usa para generar energía o se almacena como grasa o como glucógeno, volviendo a dejar ese nivel en su valor normal. Y si el nivel de azúcar en la sangre disminuye, entonces el páncreas libera glucagón, que convierte el glucógeno en azúcar. Esta realimentación negativa evita que los niveles de azúcar sean demasiado altos o demasiado bajos, y cuando falla es causa de enfermedades como la diabetes o la hipoglucemia.

En sistemas complejos a veces aparecen bucles de realimentación debido a casualidades aleatorias. Por ejemplo, en el mar de los Sargazos se encuentran muchas algas en una zona de aguas limpias donde no se supone que haya alimento para ellas. Se ha descubierto que esas algas generan vapores de compuestos de azufre que actúan como núcleos de condensación de lluvias, que arrastran hacia abajo el polvo continental, rico en minerales que necesitan las algas. ¿Por qué hay algas mar adentro, en aguas limpias donde se supone que no hay alimento? ¿Saben las algas que deben emitir azufre para producir lluvia y que les llueva el alimento del cielo? ¿Sabe el viento que debe soplar hacia ese lado, ya que allí hay algas esperando la comida que les lleva? ¿Sabe el continente que debe “producir” cierto tipo de minerales para que los arrastre el viento y los lleve a las algas? La respuesta a esas preguntas es un “no” rotundo. Se trata de una casualidad, que es aprovechada por la evolución. Y el cierre del bucle (es decir, que las algas se encuentren en el lugar correcto del mar) consiste en una realimentación negativa: las algas que se alejan del sitio correcto, mueren (Lovelock, 2000, p. 164).

REALIMENTACIÓN POSITIVA

En los sistemas con realimentación positiva, la salida se suma a la entrada (Figura 8). Estos sistemas son inestables, fluctúan, cambian incluso aunque no haya ningún estímulo de entrada. Es muy difícil controlar sistemas así. Típicamente la salida crece exponencialmente (explota) hasta llegar a algún límite (consumir todos los recursos), por lo que se suelen producir catástrofes, como explosiones, y extinciones.

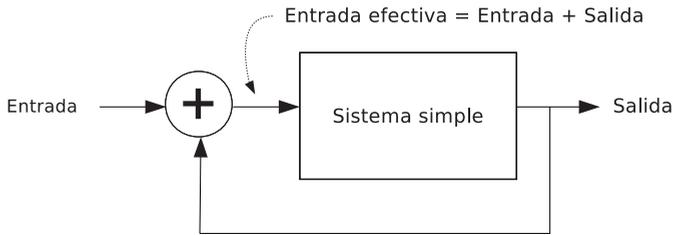


Figura 8. Realimentación positiva

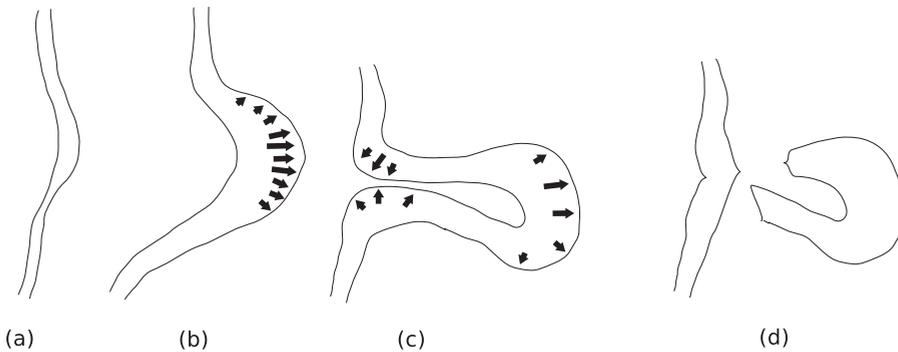
Ejemplos de estos sistemas son:

- La reproducción de conejos o cualquier otro ser vivo que disponga de recursos (alimento, oxígeno, etc.) de forma ilimitada.
- Los agentes económicos (cuanto más tienes, más ganas).
- Mantener una escoba en la palma de la mano (cuanto mayor es el desvío respecto a la vertical, más rápido se cae).
- Los meandros de los ríos (Figura 9). Cuando un río se mueve por terrenos montañosos, busca siempre la dirección de máxima pendiente hacia abajo. Pero cuando lo hace por terrenos planos, la dirección que toma es bastante arbitraria. En este último caso, el cauce se decide por pequeños accidentes del terreno o por las rocas más o menos duras con las que se encuentre, y a causa de ello el río puede hacer una pequeña curva. Lo interesante es que la curva se amplificará por un fenómeno de realimentación positiva, dado que el agua va más rápido en la parte externa (Figura 10), con lo cual ese lado se erosiona más y se alarga el meandro, mientras que en el lado interno el agua se mueve lentamente favoreciendo el depósito de sedimentos, empujando todo el río hacia el otro lado. Hay un momento donde el meandro es tan pronunciado que se estrangula consigo mismo, dejando un pequeño lago aislado (llamado madreveja) y retornando el río a un cauce rectilíneo, hasta que el proceso comience de nuevo. Y algo sorprendente es que cuando se expresa gráficamente la tendencia a formar curvas de un río conforme pasa el tiempo, este valor tiende en

el límite a π (Stølum, 1996). ¡Un número irracional encontrado en la evolución de un proceso natural! Y no es este el único caso.



Figura 9. Meandros en río Paraguaçu, Brasil



*Figura 10. Formación de meandros en ríos.
Las flechas indican cómo se desplaza la orilla*

- Un ejemplo de sistema lineal puede ser conducir un automóvil por una ciudad con muy poco tráfico. Si salgo de casa a la hora de siempre, llego al trabajo sin retrasos. Si salgo con un minuto de atraso, llego un minuto tarde. Si salgo con cinco minutos de atraso, llego cinco minutos tarde. Es una situación ideal donde fácilmente puedo predecir qué va a pasar porque el sistema es lineal. Pero si pensamos ahora en la misma ciudad cuando se aproxima la hora punta, si salgo con un minuto de retraso puedo llegar dos minutos tarde, y si salgo con cinco minutos de retraso puedo llegar veinte minutos tarde. ¡No es lineal! Todos lo hemos experimentado y sabemos la causa: al salir un poco más tarde nos encontraremos con más tráfico que hará que cada una de las calles que atravesemos lo hagamos más lentamente y tengamos también mayor probabilidad de que nos afecte cualquier mínimo incidente, que a su vez producirá que lleguemos más tarde a la calle siguiente donde ya habrá aún más tráfico debido a que la

hora punta está más cerca. En conclusión, los retrasos producen más retrasos. Es una realimentación positiva.

- La gravedad es un ejemplo interesante de realimentación positiva. Después de los primeros trescientos mil años a partir del *Big Bang*, el universo debió tener una densidad de materia uniforme (compuesta principalmente por átomos de hidrógeno y helio). Las mediciones del fondo cósmico de microondas de los proyectos COBE y WMAP de la NASA nos muestran que hubo pequeñas desviaciones respecto a esa densidad uniforme: las zonas ligeramente más densas atrajeron hacia sí más materia, aumentando su fuerza de atracción, y así sucesivamente. Este es el mecanismo de formación de los supercúmulos, cúmulos, galaxias, estrellas y planetas (Cristianfcao, 2010).

Debido a que la salida vuelve a inyectarse a la entrada para reforzarla, su crecimiento siempre es exponencial (Figura 11). Por eso estas realimentaciones no se suelen usar mucho en ingeniería: conllevan a catástrofes. Y tampoco hay tanta teoría detrás de ellas como la que hay para las realimentaciones negativas. Además, cualquier ruido a la entrada es amplificado exponencialmente, por lo cual los valores exactos de salida son difíciles de predecir. Todo lo contrario de lo que un ingeniero desea.

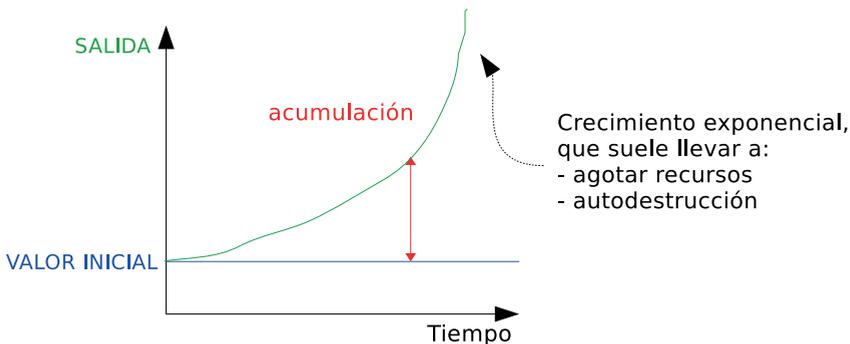


Figura 11. Evolución en el tiempo de una realimentación positiva

Cualquier proceso exponencial no se puede sostener indefinidamente. De modo que las realimentaciones positivas suelen acabar tarde o temprano de una de estas dos maneras: si alguno de los recursos de los que dependen para crecer se agota, terminan en un proceso de crecimiento cada vez más lento, hasta la saturación (Figura 12-a); también puede ocurrir que ello desencadene un cambio de signo en el proceso de crecimiento, es decir, que la

exponencial sea ahora decreciente al alcanzarse algún umbral, lo cual producirá un proceso de oscilación⁵ sostenido (Figura 12-b).

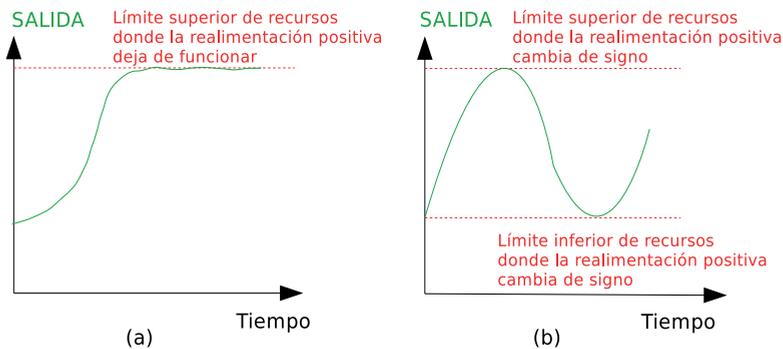


Figura 12. Como termina la realimentación positiva: a) saturación; b) oscilación

En estos ejemplos hemos visto realimentaciones por superposición (suma o resta) de la salida sobre la entrada. Pero la realidad suele ser más complicada ya que puede haber realimentaciones más complejas con multiplicaciones, divisiones o incluso operaciones no lineales, y no necesariamente de las salidas hacia las entradas, sino también desde/hasta estados internos. Los sistemas reales son difíciles de analizar. Además, hay otros efectos a considerar:

- La realimentación negativa mal hecha, con mucha ganancia o mucho retardo, puede convertirse en positiva. Los retrasos en las realimentaciones producen efectos indeseados en la mayoría de los casos. Por ejemplo, si conducimos un automóvil mirando únicamente por el retrovisor tendremos rápidamente un accidente, ya que la entrada llega con retraso. Y cuando por el espejo vemos una curva hacia la derecha es demasiado tarde para tomarla pues estaríamos fuera de la carretera. No vemos lo que está ocurriendo, sino lo que ya ocurrió. Por cierto, casi todos los sistemas políticos y económicos operan mirando el pasado, por lo que no es de extrañar que suframos graves problemas.
- En otros casos los retrasos producen efectos de estabilización. Por ejemplo, cuando se hacen compras las tiendas de barrio sobreviven porque están más cerca de ti. Si otras tiendas con mejores precios están más lejos y la información sobre sus ofertas te llega, pero tarde, o si es complicado desplazarse hasta ellas, o si compras por Internet, pero pagar es complicado, entonces todos estos factores introducen retrasos que estabilizan el sistema. Por el contrario, si tienes tiendas en Internet

5 Recordemos que las oscilaciones están muy relacionadas con las exponenciales: $\cos(x) = (e^{ix} + e^{-ix})/2$

bien establecidas, eficientes con los pagos y la entrega, y donde la información sobre precios y calidades fluye al instante —sin retrasos—, entonces cualquier tienda que venda algo con alguna ligera ventaja sobre las demás se llevará todos los clientes. El que gana, lo gana todo; y los demás pierden y quiebran. Esto puede ser bueno para los clientes pero produce sistemas muy inestables, donde incluso el mejor vendedor en un momento dado puede ser reemplazado por otro que le supere ligeramente. A largo plazo tampoco es bueno para los clientes porque se pierde variedad en la oferta y calidad en las garantías.

- La realimentación positiva, cuando el sistema se satura sin llegar a dañarse, puede convertirse en negativa, es decir, en pequeñas oscilaciones alrededor del punto de saturación, que es el nuevo punto de estabilidad.
- No es el objetivo de este libro entrar en tecnicismos, pero el análisis riguroso de las realimentaciones requiere una matemática sofisticada como las transformadas de Fourier, de Laplace, Z y wavelets, por mencionar las más conocidas. Usando las dos primeras podemos calcular la ganancia y el desfase en el bucle en función de la frecuencia (Figura 13). Un desfase de 180 grados convierte una realimentación positiva en negativa y viceversa. Y para algunas frecuencias puede haber realimentación negativa y para otras positiva.

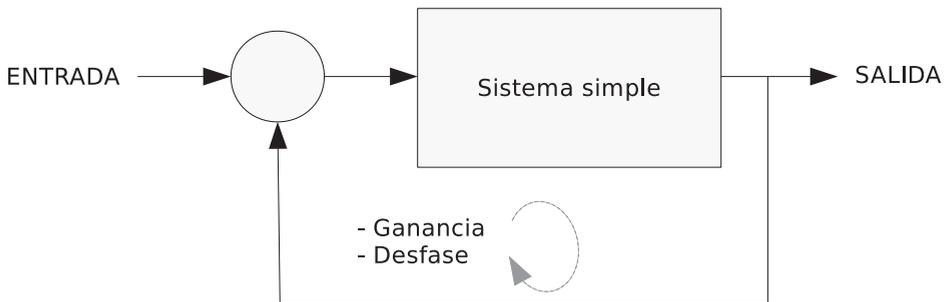


Figura 13. La ganancia y la fase en un bucle de realimentación

Algunos ejemplos de lo complejo que es entender y controlar la realimentación:

- Si tenemos un amplificador de sonido conectado a un micrófono y un parlante, y acercamos el micrófono al parlante, habitualmente hay una frecuencia dominante para la cual la ganancia es 1 (es decir, lo que se introduce por el micrófono se amplifica de modo que, al ser reproducido por el parlante, sale el mismo sonido con la misma amplitud que el original) y un desfase de 0 grados o múltiplos enteros de 360 grados,

con lo cual la onda de salida se suma a la de la entrada. El resultado de ello es el llamado “acople”, o sea, un pitido bastante molesto.



Figura 14. Cámara rotada apuntando a la pantalla, usando el programa Cheese en Linux

- Si se conecta una *webcam* a un computador de modo que reproduzca el video capturado en su pantalla, y se apunta la *webcam* a la propia pantalla, tenemos un bucle de realimentación. Acercando más la *webcam* a la pantalla y girándola en diversos ángulos obtendremos imágenes estáticas fractales (Figura 14), que se explican en el correspondiente capítulo. Por otro lado, si se introduce algún tipo de filtro no lineal en la imagen, podemos obtener imágenes dinámicas (Figura 15) con una complejidad emergente que no es obvio entender de dónde surge pues la imagen se mueve a pesar de que todo lo que está grabando permanece quieto.

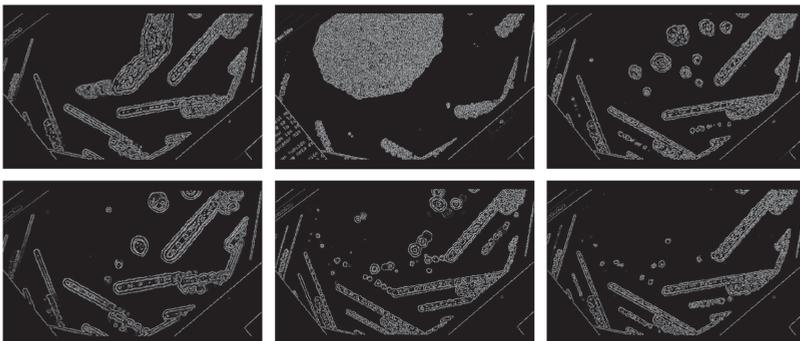


Figura 15. El mismo montaje anterior, pero usando un filtro de contorno. Se capturaron 6 instantáneas

- Las encuestas previas a una votación introducen realimentaciones con resultados difíciles de prever. Si una encuesta indica un “Sí” rotundo a alguna cuestión, los votantes partidarios de esa opción podrían relajarse y dejar de ir a las urnas, pues el resultado les da una victoria holgada y, unos pocos votos de más o de menos no van a importar. Pero razonando así, el resultado puede terminar siendo lo contrario de lo que se esperaba.
- Habitualmente no se tiene control de todas las variables involucradas, por lo que al intentar controlar por realimentación solo una puede que se obtenga el efecto contrario al deseado. Imaginemos un alcalde que necesita ingresos para mejorar la infraestructura de su ciudad. Lo usual es que aumente para ello los impuestos. El total de dinero recaudado es $T=NC$, siendo N el número de habitantes y C la contribución que paga cada uno (Figura 16). El alcalde imagina este modelo, pero no tiene control sobre la variable N . Lo más probable que ocurra al subir las contribuciones es que la gente se vaya a otras ciudades o aumente la evasión, disminuyendo drásticamente el total del ingreso que obtiene en realidad. Para conseguir lo que desea debe hacer justo lo contrario: disminuir impuestos para atraer gente que quiera vivir allí. El modelo es más complicado, porque si todas las ciudades hacen lo mismo, competirán entre sí por conseguir más habitantes.

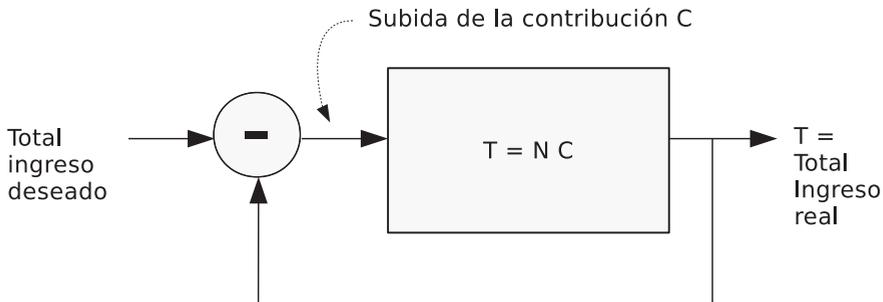


Figura 16. Modelo ingenuo de recaudación de impuestos

Lo que pretendo con estos ejemplos es dejar claro que las realimentaciones cambian radicalmente el comportamiento de los sistemas, muchas veces de manera impredecible.

Las exponenciales son difíciles de detectar al principio, porque casi no hay cambios o, si llegan a ser detectables, solemos pensar que son lineales. La mejor forma de detectarlas es buscando la presencia de un bucle. La pregunta que hay que hacerse es: ¿existe un fenómeno que cuanto más se dé, más acelera su propio crecimiento?

Por ejemplo, mi abuelo, campesino, vivió el paso del azadón al tractor. Si yo le hubiera dicho hace 50 años que ello desembocaría en tractores autónomos, que aran el campo sin intervención humana, se habría reído de mí. Pero eso era razonable de esperar por cuanto existía y existe un bucle de realimentación positiva: la primera etapa —el paso del azadón al tractor— tuvo éxito porque permitía hacer los trabajos más rápido, produciendo mayores ganancias monetarias que podrían invertirse en mejorar las tecnologías, que a su vez generarían más ganancias. El bucle está allí. A pesar de ello es imposible predecir si todo el proceso se va a dar, pues pueden aparecer inconvenientes como que los costos tecnológicos aumenten (con lo cual desaparece la realimentación positiva). Tampoco es sencillo saber cuál va a ser el resultado final. Al respecto recordemos que actualmente ya hay tractores autónomos, pero seguramente aparecerán cosas mejores, dado que la realimentación positiva sigue en marcha. Ni siquiera sabemos si aparecerán realimentaciones negativas que estabilicen el proceso en algún punto, o realimentaciones positivas que entren en competencia con la automatización, como mano de obra humana cada vez más barata. Predecir el futuro es difícil, como bien decía Niels Bohr, pero si se va a hacer, hay que estar atento a detectar la formación de bucles de realimentación, más que a los efectos inmediatos que produzcan.

En ingeniería se busca la realimentación negativa para que el sistema sea estable, predecible y controlable, y se intenta anular la positiva. Pero nosotros, para crear complejidad en un sistema necesitamos una combinación de ambas realimentaciones. Y hay que volver a insistir en que la negativa es fácil de estudiar, mientras que la positiva no, porque depende fuertemente de ruidos (errores) que haya en el ambiente. En la negativa los errores desaparecen, mientras que en la positiva los errores se quedan o incluso se amplifican.

Es importante que quede claro que la única manera de generar complejidad en un sistema es usando bucles de realimentación entre sus partes constituyentes. Y cuando hay realimentación suelen aparecer otros fenómenos asociados a la complejidad: fractales, caos y leyes de potencia. Pero la realimentación es lo básico. Típicamente existe una realimentación negativa que estabiliza el sistema hasta que aparece una positiva, que lo desborda y lo lleva a trabajar de una forma nueva. Esto sería mortal para el sistema —pues las exponenciales terminan mal— a no ser que aparezca una nueva realimentación negativa que lo estabilice en un nuevo punto de trabajo. El sistema ha cambiado. Entonces se dice que ha habido emergencia de algo nuevo y este es un mecanismo clave para generar complejidad.

REALIMENTACIÓN DISTRIBUIDA

La teoría de control estudia las realimentaciones que ya hemos abordado, y supone que el sistema es único y está ubicado espacialmente en un solo sitio. Pero la realidad es otra: los sistemas de vida artificial están compuestos por una multitud de objetos distribuidos espacialmente, donde no hay ninguno que tenga el control sobre los demás, y donde el comportamiento de cada uno afecta y es afectado únicamente por sus vecinos. Entonces, aunque *grosso modo* todo lo dicho hasta ahora sigue siendo válido, el estudio en detalle de un sistema de estos es terriblemente complejo e incluso imposible por métodos analíticos. Por ello se recurre a simuladores en *software*.

Estos simuladores pueden ser específicos para cada sistema, o pueden ser más generales, como los autómatas celulares en los que se incorpora directamente la espacialidad y la limitación de la interacción entre objetos, que solo puede darse cuando son vecinos.

Reproducción

Un ejemplo de realimentación positiva distribuida espacialmente es la reproducción. Si tienes una pareja de conejos, en poco tiempo tendrán hijos que, a su vez tendrán más hijos. Si la tasa de fertilidad es constante y no muere ningún conejo, la curva que representa el número de parejas de conejos conforme pasa el tiempo es, aproximadamente⁶, una exponencial. Para ello podemos inventarnos dos modelos:

Cada cierto periodo, cada pareja de conejos tiene una pareja de hijos, duplicándose la población (Figura 17). La secuencia es entonces: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128...



Figura 17. Reproducción exponencial

6 Ya que la secuencia de conejos es discreta, mientras que la función exponencial es continua.

O podemos poner un retraso de maduración sexual de un periodo. Todas las parejas de conejos tienen hijos. Inicialmente hay una pareja y, después del periodo de maduración, sigue habiendo una pareja. En el siguiente periodo tienen una pareja de hijos. En el siguiente, los hijos maduran, pero los padres ya lo están por lo que continúan con otra pareja de hijos, de modo que la cantidad de parejas de conejos en cada periodo es: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34... Esta es la archiconocida secuencia de Fibonacci (Figura 18), donde cada término se calcula sumando los dos anteriores (Ec. 4). Y es también exponencial, aunque más lenta que la anterior debido al retraso de maduración.

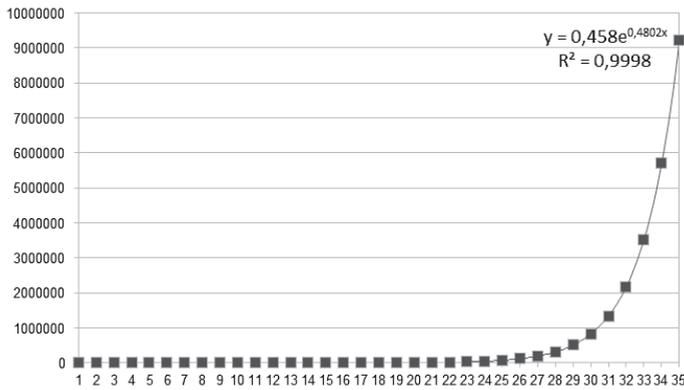


Figura 18. Reproducción exponencial con retrasos (secuencia de Fibonacci)

$$\begin{aligned}
 F_1 &= 1 \\
 F_2 &= 1 \\
 F_n &= F_{n-1} + F_{n-2}
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 4}$$

La secuencia de Fibonacci se puede expresar también como:

$$\begin{aligned}
 f_n &= \frac{\varphi^n - (1-\varphi)^n}{\sqrt{5}} \\
 \text{siendo } \varphi &= \frac{1+\sqrt{5}}{2}
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 5}$$

Que, para valores grandes de n es aproximadamente:

$$f \approx \frac{\varphi^n}{\sqrt{5}}
 \tag{Ec. 6}$$

Donde se ve claramente que es una exponencial. Al número irracional $\varphi \approx 1.61803398874\dots$ se le llama relación áurea o número áureo y también puede ser calculado aproximadamente como la relación entre dos términos consecutivos de la serie de Fibonacci. Conforme los términos son más altos, la aproximación es mejor:

$$\varphi = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f_n}{f_{n-1}} \quad \text{Ec. 7}$$



Figura 19. Margarita con 13 espirales dextrógiras (en rojo) y 21 levógiras (en verde)

El número áureo se encuentra en muchas situaciones en la naturaleza. Un ejemplo bastante utilizado es el de los girasoles y las margaritas, que tienen sus semillas empaquetadas de tal forma que se pueden identificar dos tipos de espirales, dextrógiras y levógiras. En muchos libros nos dicen que si contamos el número de espirales que hay en cada sentido suelen salir dos números de Fibonacci consecutivos (como en la figura 19) que, al dividirlos entre sí, se aproximan al número áureo.



Figura 20. Margarita con 18 espirales dextrógiras (en rojo) y 16 levógiras (en verde)

En la práctica es difícil encontrar espirales tan perfectas, pues están en crecimiento, han sufrido problemas ambientales y tendrán imperfecciones genéticas, como las margaritas de la figura 20 o el girasol de la figura 21.



Figura 21. ¿Cuántas espirales tiene un girasol?

CONGESTIÓN EN EL TRÁFICO

Se ha realizado un divertido experimento de tráfico de vehículos pidiendo a varios conductores seguir una pequeña carretera circular. Aunque al principio comienzan equiespaciados, inevitablemente hay alguno que acelera un poco más acercándose demasiado al de delante. El de atrás, al ver un espacio mayor, también acelerará, y así sucesivamente. El inconveniente es que conforme se aproximen a los de delante, se verán obligados a frenar y cada uno lo hará cada vez más bruscamente. Y el que está delante de todos acelerará, al ver atrás de sí un vehículo muy próximo. El algoritmo es así: *si hay más espacio delante o menos atrás, acelerar; si hay menos espacio delante o más atrás, frenar*. Aparentemente es una realimentación negativa pero, como es distribuida, cada conductor la ejecuta asíncronamente y bajo sus propios criterios, y ello produce fenómenos impredecibles de congestión. Concretamente, lo que se observa es una onda de compresión propagándose hacia adelante en la carretera (Figura 22).

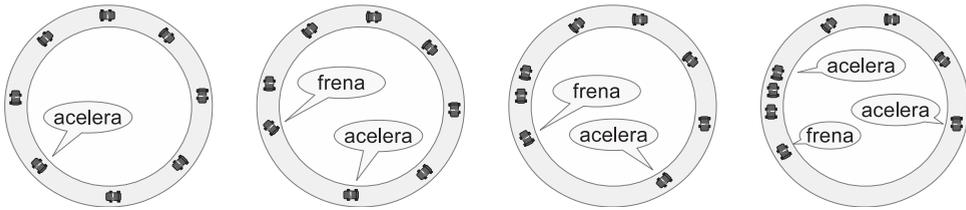


Figura 22. Carretera circular en instantes de tiempo sucesivos

El trabajo completo puede leerse en Sugiyama *et ál.* (2008), que contiene varios videos.

AGLOMERACIÓN DE PERSONAS

Algo similar ocurrió en el 2006 en Arabia Saudí, cuando cientos de peregrinos murieron aplastados por causas desconocidas. El incidente volvió a repetirse un año después con la diferencia de que esta vez habían puesto cámaras en los recorridos y pudieron registrar lo que ocurrió. Y descubrieron que era similar al ejemplo anterior de tráfico. Cualquier incidente menor hacía que la fila se detuviera, con lo cual las personas de atrás frenaban y se apretaban más, produciendo una onda de presión que se propagaba hacia atrás. Era realmente una onda, aunque de densidad de personas, lo que significa que se reflejaba en los recodos e interfería consigo misma. Donde la interferencia era constructiva aparecían grandes máximos y mínimos de presión. En los máximos ocurrían los problemas.

Cada persona tomaba decisiones locales razonables: avanzar más deprisa si había mucho espacio vacío por delante, y frenar si no lo había. Pero ese conjunto de bucles de control locales producía globalmente fenómenos no deseados.

Al año siguiente rediseñaron la ruta para evitar estos problemas. La historia completa, con otros ejemplos de comportamientos distribuidos, la relata Peter Miller (2010).

GAIA

James Lovelock planteó la hipótesis Gaia al afirmar que nuestro planeta Tierra es un conjunto enorme de bucles de realimentación. El tema está desarrollado en muchos de sus libros, con varios niveles de profundidad desde el técnico al divulgativo, pero recomiendo en particular *Las edades de Gaia* (2010), donde explica que hay fuertes interrelaciones entre todas las partes de nuestro planeta. Lo que ocurre en la atmósfera afecta a los océanos, lo que ocurre en los bosques afecta a la atmósfera, lo que ocurre en los océanos

afecta a los bosques, de modo que todo está interrelacionado. Incluso las placas tectónicas tienen que ver con la vida, pues en sus bordes se acumulan bolsas de petróleo que facilitan su movimiento.

Lovelock aporta varios ejemplos interesantes, de los cuales quiero resaltar uno: los árboles y las algas emiten hacia la atmósfera bisulfuro de metilo, un compuesto químico que sirve como núcleo de condensación del vapor de agua de las nubes. Por eso suele llover donde hay árboles. Y hay árboles donde suele llover. Es un bucle de realimentación positivo y distribuido, sin un control central que decida todo.

Otro ejemplo que no está en este libro, es más sofisticado. Involucra la rotación del núcleo terrestre metálico, que produce un campo magnético que evita que el flujo de partículas procedente del sol impacte en la atmósfera sacándola hacia el espacio. Gracias a esto hay vida en la Tierra y, en particular, el *Homo Sapiens*, que se encuentra en estos momentos haciendo planes para mantener ese campo magnético en caso de que falle por causas naturales. E incluso está planeando cómo crear un escudo magnético similar en Marte para regenerar su atmósfera, que se perdió por la falta de uno (Green, 2017). El objetivo es colonizar Marte, es decir, reproducir la civilización humana terrestre allí. Este es un ejemplo de evolución con un bucle de realimentación.

DAISYWORLD

Es uno de los primeros sistemas de control distribuido artificial, diseñado por James Lovelock para comprobar la teoría Gaia. A él le intrigaba que la temperatura de la Tierra fuese estable durante muchos millones de años, a pesar de haber fluctuaciones en la energía que emite el sol. Las estrellas al principio de su ciclo son más frías, y se calientan al envejecer. Sin embargo, la temperatura de la Tierra no ha sufrido cambios tan grandes en todo este tiempo, lo cual ha favorecido el nacimiento y existencia de los seres vivos que la habitamos.

El modelo consiste en un planeta cubierto completamente por dos tipos de margaritas, blancas y negras. Las negras absorben más luz y se calientan (y calientan su entorno). Las blancas reflejan la luz hacia afuera del planeta. De esta forma, el albedo⁷ total del planeta depende de la proporción entre estos dos tipos de margaritas.

Además, las margaritas tienen un rango de temperaturas donde pueden sobrevivir, típicamente entre 5°C y 40°C, así como una temperatura óptima donde se reproducen más deprisa, típicamente 22°C.

⁷ Coeficiente de reflexión de la luz.

Cuando en un principio el sol generaba poca energía, había pocas margaritas blancas y muchas negras, de modo que el albedo del planeta era bajo y absorbía mucha de la energía que le llegaba, aumentando su temperatura. Conforme el sol calentaba, aparecían más margaritas blancas y morían más negras, de modo que el albedo aumentaba, reflejando una cantidad considerable de la energía solar recibida y logrando así mantener estable la temperatura del planeta.

El resultado es un bucle de realimentación distribuido, que captura más energía cuando llega poca, y refleja mucha energía cuando llega mucha, manteniendo así estable la temperatura del planeta⁸.

Hay modelos más sofisticados con margaritas de diversos colores, e incluso con conejos que se comen las margaritas y zorros que se comen los conejos. En ellos también se logra estabilizar la temperatura del planeta.

El último libro de Lovelock, más comercial y menos científico que los anteriores, se titula *La venganza de Gaia* y viene a decirnos que hemos destruido muchas cosas naturales y que ahora el planeta va a vengarse de nosotros, aunque el final es feliz como en los cuentos de hadas. La realidad es bastante distinta. El planeta no necesita tener intenciones ni tomar decisiones voluntarias vengativas. El problema es solo de bucles de realimentación positivos y negativos que han dado lugar al soporte adecuado para que nazca la vida y, con ella, nosotros. Si rompemos esos bucles nos va a ir mal, porque todos los organismos hemos evolucionado adaptándonos a estas realimentaciones. Desgraciadamente eso es lo que estamos haciendo con el cambio climático, que produce oscilaciones de temperaturas cada vez más bruscas. Este es el comportamiento típico de bucles de realimentación positiva que están superando a los negativos que tenían estabilizado al planeta.

Algo similar ocurrió en el Precámbrico, una época en la que casi no había oxígeno en la atmósfera de la Tierra. Las bacterias vivían muy bien en un ambiente de anhídrido carbónico y metano, porque el oxígeno es muy reactivo, prácticamente un veneno para ellas. Entonces le empezó a ir muy bien a una bacteria que comía mucho y generaba oxígeno como deshecho. Se reprodujo mucho, demasiado, y llenó la atmósfera de contaminación venenosa: el oxígeno. Como consecuencia, ocurrió una extinción masiva de seres vivos que no estaban adaptados a tanto oxígeno.

8 Alexander (2012) nos ofrece un modelo interactivo con el que podemos jugar.

SINCRONIZACIÓN

Una propiedad muy importante en sistemas de vida natural y artificial es la sincronización distribuida, es decir, sin control centralizado, de muchísimos individuos. Ocurre de forma natural con los cantos de muchos animales, como las cigarras que uno escucha en las carreteras y que dan la sensación de ser un único zumbido que siempre está allí, como si se tratara de un animal de varios kilómetros de longitud. Ocurre con las células del corazón, que pueden oscilar a distintas frecuencias cuando se las cultiva *in vitro*, pero que se sincronizan en cuanto se ponen en contacto unas con otras.

Cuando se trata de seres vivos uno podría pensar que actúan coordinadamente por su propia voluntad, pero probablemente no sea así, ya que este fenómeno existe incluso en sistemas muy alejados de los biológicos. Recuerdo hace muchos años haber hecho un experimento similar al de las células del corazón, con osciladores electrónicos analógicos a transistores, tratando de diseñar un sintetizador de sonidos. Cada circuito oscilaba a una frecuencia distinta y yo pensaba ingenuamente que al unir todas las salidas obtendría la suma de las frecuencias. No fue así. Obtuve una sola frecuencia. En electrónica, esto se debe a que las salidas de los circuitos analógicos con transistores son también entradas. Y entonces, la salida de cada oscilador se colaba al interior de los otros osciladores, hasta que se pusieron de acuerdo, por así decir, en la frecuencia a la cual oscilar todos a la vez. Con los modernos amplificadores operacionales que vinieron después, esto no volvió a suceder debido a que las salidas eran unidireccionales, es decir, no permitían que por ellas entrase ninguna perturbación al circuito⁹.

Una forma muy sencilla de visualizar el fenómeno de la sincronización es ubicando muchos metrónomos¹⁰ en una plataforma flotante que se puede mover libremente, por ejemplo, suspendida de cuerdas: aunque los metrónomos inicialmente van cada uno a su ritmo, en pocos minutos se sincronizan todos. No hay nada mágico en ello. Por la segunda ley de Newton, a cada impulso que dan al péndulo hacia un lado corresponde un impulso de la plataforma hacia el lado contrario, de manera que los metrónomos intercambian energía a través de la plataforma (Santos, 2013). Es muy fácil entender por qué la transferencia de energía produce sincronización gracias a que la gravedad interviene de una forma no lineal, donde aportando poco se puede obtener mucho. Recordemos lo que ocurre cuando empujamos a

9 Técnicamente hablando, en el modelo híbrido del amplificador operacional $h_{12} \approx 0$ y $h_{22} \approx \infty$, lo cual no ocurre con los transistores.

10 Pequeños péndulos que usaban los músicos del siglo pasado.

una niña en un columpio: si la empujamos cuando está en el extremo más alto y cercano a mí (Figura 23-a), basta con un empujoncito suave para que se transforme en mucha velocidad cuando llega al punto más bajo. Pero si la empujamos en cualquier otro punto nos cuesta más esfuerzo. E incluso si tratamos de hacerlo cuando el columpio está en el lado derecho regresando hacia a mí (Figura 23-b) va a pasar justo lo contrario: el columpio me transferirá energía, golpeándome y empujándome hacia atrás, hacia donde yo debería estar. De alguna forma, ese golpe me está sincronizando.

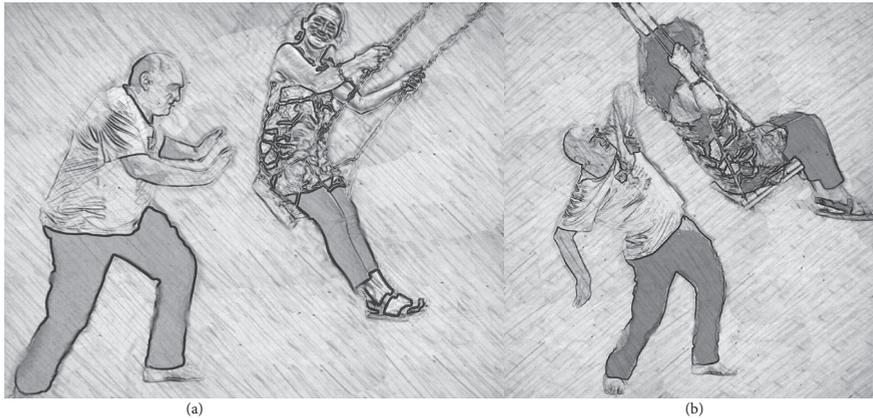


Figura 23. Columpio: (a) momento correcto para transferir energía; (b) momento equivocado

De hecho, cuando de niño uno aprende a columpiarse solo, enviando las piernas hacia adelante cuando el columpio avanza y encogiendo las piernas cuando el columpio retrocede, sigue el mismo principio. Se trata de un péndulo doble sincronizado, de modo que la energía muscular del niño se transfiere al columpio.

Una de las personas que más tiempo le ha dedicado a este fenómeno es Steven Strogatz. Puedes leer su libro (2004) aunque antes te puede motivar un corto video de resumen (2008), donde incluye imágenes muy bonitas de bandadas de pájaros y bancos de peces.

La sincronización es una mezcla de varias realimentaciones. Por un lado suele haber una realimentación positiva en cada individuo que lo hace oscilar. Por otro lado, suele haber un medio de comunicación entre ellos que permite otra realimentación positiva: cuanto más se empuje en una dirección, más se verán arrastrados los otros individuos a moverse de la misma manera. La sincronización es, seguramente, una forma de construir superindividuos como un conjunto de individuos que funcionan de manera coordinada.

RESUMEN

Cuando tenemos una cantidad de objetos similares, si no interactúan entre sí el resultado final se puede analizar como la suma de los comportamientos de cada objeto. Pero si interactúan entre sí, el sistema no es lineal y se puede modelar de varias formas. La que hemos elegido aquí es a través de realimentaciones, donde la salida del sistema modifica la entrada.

Hay dos tipos de realimentaciones: las negativas, que producen estabilidad pues se oponen a las perturbaciones que puedan llegar por la entrada del sistema, y las positivas, que producen inestabilidades fuertes típicamente traducidas a crecimientos o decrecimientos exponenciales, oscilaciones, saturación (donde el sistema deja de responder a las entradas) e incluso la propia destrucción del sistema. Los ingenieros diseñan sus sistemas (mecánicos, electrónicos, hidráulicos, etc.) usando realimentaciones negativas. Pero la naturaleza usa también las positivas pues son fuente de creatividad.

Los humanos no tenemos una intuición clara de lo que significa una exponencial, pues al principio su crecimiento es tan lento que ni siquiera lo detectamos. Cuando ya se hace obvio, suponemos que es un crecimiento lineal. Y para cuando todas las predicciones fallan y comenzamos a entender lo que ocurre, el fenómeno puede ser ya imposible de manejar. Por ejemplo, en ciencia, ingeniería o cualquier rama del saber que genere nuevo conocimiento, los científicos suelen ser muy conservadores en sus predicciones. Estoy trabajando en un proyecto que comienza a entregar resultados prometedores. Sé que la mayoría de proyectos de investigación requieren más tiempo del presupuestado por lo que, si me preguntan, diré que en un par de años tendremos los resultados definitivos y que, seguramente en cincuenta años habrá aplicaciones industriales útiles para la humanidad. Pero no me doy cuenta que en la misma área en que yo trabajo hay millones de otros científicos e ingenieros, trabajando en proyectos similares, por lo que es poco probable que yo sea el primero en resolver el problema planteado. Puede haber alguien que lo encuentre antes. Y para esa persona la perspectiva es la misma. De modo que seguramente se encontrará el resultado antes de los dos años que vaticino. Pero, además, hay una red distribuida de investigadores usando unos los resultados de los otros. Hay bucles. Cualquier avance en un campo puede producir avances en otros, rápidamente y en cascada. Esos cincuenta años que creo que se necesitan para que el producto sea viable comercialmente, y que he calculado bajo la perspectiva de mi propio trabajo aislado, se pueden convertir en diez, en cinco o en menos, porque no soy consciente de la red de bucles que hay a mi alrededor que van a producir un crecimiento exponencial de conocimientos.

Habitualmente un sistema complejo se encuentra estabilizado por una realimentación negativa, hasta que ocurre un fenómeno imprevisto que produce una realimentación positiva o destruye la negativa que lo tenía estabilizado. A partir de allí, la realimentación positiva dominante producirá un (de)crecimiento exponencial de alguna de sus variables. El sistema podría autodestruirse a no ser que aparezca una realimentación negativa que lo vuelva a estabilizar en otro estado distinto. En ese momento se dice que ha habido emergencia de algo nuevo.

Entender que los sistemas complejos tienen realimentaciones puede ayudarnos a evitar acciones ingenuas al intentar resolver problemas. Por ejemplo, si pensamos en las cada vez más bruscas oscilaciones de temperatura que sufrimos, es razonable suponer que son producidas por un bucle de realimentación positiva que tomó el control debido a que hemos roto un bucle de realimentación negativa que estabilizaba el sistema. Existe un proyecto para poner en órbita una gran pantalla que haga sombra a la Tierra. Con ello se logrará bajar la temperatura promedio pero no se evitarán las fuertes oscilaciones, pues bajará tanto el valor máximo como el mínimo de temperatura (Figura 24-b). Será un alivio bajar la temperatura máxima, pero al bajar también la mínima se producirá otro tipo de catástrofes. Si deseamos disminuir las oscilaciones (Figura 24-c), hay que restaurar el bucle de realimentación negativa perdido, o hay que disminuir la ganancia del bucle de realimentación positiva que provoca las oscilaciones, quién sabe cómo.

Además, la temperatura promedio del planeta va en aumento, lo que provoca deshielos en el Ártico y la Antártida. El hielo, al desprenderse y caer al mar, enfría su temperatura. Es un bucle de realimentación negativa, lo cual, contra la opinión general, de momento es bueno. Lo malo vendrá cuando desaparezca todo el hielo porque dejará de existir ese bucle que trataba de estabilizar la temperatura, y con ello las consecuencias serán peores.

De la misma manera, el aumento de la temperatura del océano produce huracanes que son catastróficos para la infraestructura y la vida humana. Pero desde un punto de vista sistémico son solo una realimentación negativa que intenta estabilizar esa temperatura, succionando el agua caliente hacia la parte alta de la atmósfera, donde se enfría, e incluso mezclando las profundas aguas frías con las superficiales, más calientes.

Apenas comenzamos a tener consciencia de nuestro propio planeta con sus bucles de realimentación, lo cual nos está permitiendo entender que las acciones locales pueden tener consecuencias globales. La NASA (2017) acaba de publicar un bonito video al respecto.

Lo mismo ocurre con tantos otros sistemas, como el cuerpo humano. Si tenemos fiebre alta, hay que bajar la temperatura con baños de agua o antipi-

réticos para evitar daños en el cerebro (Figura 24-a). Pero si lo que tenemos es una fuerte oscilación, por ejemplo de presión sanguínea o de glucosa en la sangre, de poco sirve aplicar remedios similares. Si se disminuyen todos los niveles de glucemia lograremos mantener el más alto en un rango aceptable, pero el más bajo puede caer tanto que nos produzca un desmayo (Figura 24-b). Lo que hay que hacer es regular los bucles de control, aumentando la ganancia de las realimentaciones negativas, para estabilizar o disminuir la de las positivas, con el objetivo de menguar el rango de las oscilaciones (Figura 24-c).

En resumen, cuando hay oscilaciones no es lo mismo disminuir el valor máximo (Figura 24-b) que disminuir el rango (Figura 24-c), mientras que cuando no hay oscilaciones sí es lo mismo (Figura 24-a). Esto debería ser cultura general, porque se puede hacer mucho daño realizando regulaciones incorrectas.

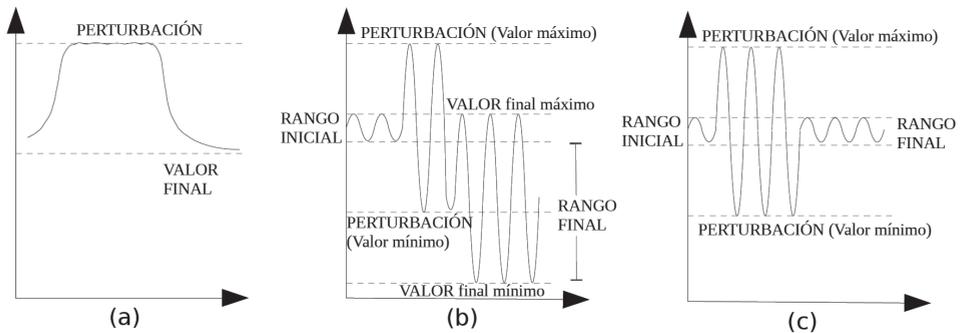


Figura 24. Perturbación y su posterior estabilización: (a) y (b) a un valor final máximo; (c) a un rango final

Las realimentaciones en sistemas de vida artificial suelen ser distribuidas. Ningún objeto del sistema controla a todos los demás. Y cada objeto interactúa apenas con sus vecinos. El resultado de ello es mucho más difícil de prever y para lograrlo hay que utilizar algún simulador en *software*.

Las realimentaciones son el camino para crecer en complejidad, cuando todavía no existe la evolución. Cuando ya existe la evolución, tiende a estudiarse de forma separada, pues es un mecanismo mucho más potente para generar complejidad. Y, por si fuera poco, también puede haber interacciones entre las realimentaciones y la evolución.

Las realimentaciones producen sistemas complejos no lineales donde típicamente se harán presentes tres fenómenos conocidos: el caos, los fractales y las leyes de potencia, que estudiaremos a continuación.

REFERENCIAS

Libros, artículos y enlaces web

- Alexander, Ch. (2012). *Welcome to DaisyWorld*. Recuperado el 27 de agosto de 2017. Disponible en: <https://github.com/siu07cja/DaisyWorldWeb>
- Green, J. L., Hollingsworth, J., Brain, D. *et ál.* (2017). A Future Mars Environment for Science and Exploration. *Planetary Science Vision 2050 Workshop*. Washington: NASA.
- Lovelock, J. (2000). *Las edades de Gaia*. Barcelona: Tusquets Editores.
- Miller, P. (2010). *The Smart Swarm: How Understanding Flocks, Schools, and Colonies Can Make Us Better at Communicating, Decision Making, and Getting Things Done*. New Jersey: Avery Publishing Group, Inc.
- Phillips, C. L. y Harbor, R. D. (1988). *Feedback Control Systems*. New Jersey: Prentice Hall.
- Stølum, H.-H. (1996). River Meandering as a Self-Organization Process. *Science* 271(5256), pp. 1710-1713. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.271.5256.1710>
- Strogatz, S. (2004). *SYNC: The emerging Science of Spontaneous Order*. London: Penguin Books.
- Sugiyama, Y., Fukui, M., Kikuchi *et ál.* (2008). Traffic jams without bottlenecks: experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. *New Journal of Physics*, 10.
- Zilouchian, A. y Jamshidi, M. (2001). *Intelligent Control Systems Using Soft Computing Methodologies*. Boca Ratón: CRC Press.

Películas y videos

- Clore, J. (2010). *Feedback loops*. Recuperado el 2 de septiembre de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/NSk5FZ>
- Cristianfcao (2010). *The Cosmic Web, or: What does the universe look like at a very large*. Recuperado el 18 de julio de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/iwhUZJ>
- Dedoimedo (2015). *Camera + monitor video feedback loop experiment*. Recuperado el 12 de junio de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/ocnugb>
- Emerton, M. (2007). *Fractal Video Feedback Effects*. Recuperado el 2 de septiembre de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/Y6VYcx>
- NASA (2017). *Our Living Planet From Space*. Recuperado el 21 de noviembre de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/x3ryGj>
- Santos, W. (2013). *32 Metrónomos desorganizados entram em sincronismo Como?* Recuperado el 27 de agosto de 2017. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=CR-_yLEX-D4

Strogatz, S. (2008). *How things in nature tend to sync up*. TED. Recuperado el 27 de agosto de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/YvWA7r>

Villatoro, F. (2008). *Traffic Jam without bottleneck: experimental evidence*. Recuperado el 23 de agosto de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/EB5PH4>

