

Positiva es la retroalimentación negativa

W. Luis Mochán

El Dr. W. Luis Mochán es investigador en el Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM y miembro de la Academia de Ciencias de Morelos. Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

Equilibrio

Súbase a su bicicleta. ¿No tiene? Pida una prestada o pídale a un amigo que le ayude a hacer el siguiente ejercicio. Empiece a pedalear. Gradualmente baje la velocidad y ruede lo más lentamente que pueda. Observe el manubrio. Notará que gira de un lado al otro; mientras más lento se desplace la bicicleta, más grandes y abruptas serán las oscilaciones de la dirección. Usted está al control, pero parecerá que se mueve solo, como si tuviera voluntad propia (Fig. 1). Piense unos minutos, ¿por qué gira el maneral hacia uno y otro lado? ¿para qué? Ahora cierre los ojos (si no lo ha hecho, le recomiendo que se baje primero de la bicicleta), póngase de pie, apoye todo su peso sobre su pie derecho y doble la pierna izquierda despegando el otro pie del piso. Concéntrese en los músculos de la pierna derecha. Notará que abruptamente se tensan y se relajan, sentirá la tensión oscilar entre los tendones a uno y otro lado de su tobillo. Quizás también se muevan sus brazos y la otra pierna. ¿Por/para qué? Tome un bat de beisbol, un palo de escoba o una varilla larga. Coloque un extremo en la punta del dedo índice de una de sus manos (hágalo lejos de cualquier objeto frágil, como vasos, platos, mesas, ventanas, o las cabezas de sus amigos y familiares). Notará que, quizás tras un poco de práctica, puede mantener vertical al objeto y evitar que caiga, aunque para ello, tendrá que mover la mano continuamente para uno y otro lado, y quizás correr hacia adelante y hacia atrás. ¿Por qué?

Retroalimentación

Los anteriores son ejemplos de sistemas intrínsecamente inestables. Si no controlara la dirección de la bicicleta, ésta caería en un dos por tres, si no hiciera esfuerzos en su pierna, usted caería al suelo, y si no moviera la mano continuamente, el bat caería (y quizá le pegaría en la cabeza). ¿Por qué no se cae la bicicleta? Ésta, sostenida por sólo dos puntos de contacto con el piso, empieza a caerse inmediatamente hacia algún lado, digamos, hacia la derecha. Un buen ciclista se daría cuenta pues se lo advertirían los *otolitos* de los canales *semicirculares* en su oído,

que forman parte del sentido del equilibrio. Entonces, en forma automática, quizá sin tener conciencia de ello, daría vuelta hacia la derecha. La *fuerza centrífuga* impulsaría entonces al ciclista y a la bicicleta hacia la izquierda, quizá rebasando la vertical para iniciar una nueva caída, hacia el lado izquierdo. Pero entonces, nuestro alerta ciclista giraría el volante hacia la izquierda, produciendo una fuerza centrífuga que ahora apuntaría a la derecha y que de nuevo regresaría a la bicicleta a la verticalidad. Cuando la bicicleta avanza rápidamente, estos movimientos son pequeños y casi imperceptibles, pero cualquier ciclista lo hace continuamente de forma automática. Si no los hiciera, caería (referencia [1]) en un instante. Cuando se avanza muy lentamente, dichos movimientos se vuelven abruptos, de gran amplitud y fácilmente observables. Cuando nos paramos en un solo pie activamos nuestros músculos para evitar que nuestro centro de gravedad rebase nuestra angosta base de apoyo. Cuando balanceamos el bat, evitamos cada caída impulsando su base en la misma dirección en que cae, haciéndole caer de nuevo pero en la dirección opuesta, y repitiendo.

Estabilidad

Los anteriores son ejemplos de sistemas con *retroalimentación negativa*. Sistemas que son inherentemente inestables, pero que son *observados*, *sensados* por un agente que produce una acción que corrige su movimiento para regresar al sistema al estado deseado, *estabilizándolo*. Arriba, el agente era una persona, pero los agentes pueden ser mecanismos automáticos, por ejemplo, el regulador centrífugo de una máquina de vapor (fig. 2, ref. [2]), el termostato que



FIGURA 2. GOBERNADOR formado por un par de esferas que giran pudiendo alejarse o acercarse al eje y que controlan una máquina bajando su velocidad a través de una válvula que se cierra cuando las esferas se alejan del eje debido a una velocidad y fuerza centrífuga excesiva. Imagen tomada de https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/38/Ashton_Frost_engine_governor.jpg (Globbet, CC BY-SA 3.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>, via Wikimedia Commons).

regula la flama de su calentador de agua (fig. 3, ref. [3]) o el que prende el compresor de su refrigerador, o el flotador que interrumpe el flujo de agua hacia su tinaco, cisterna o escudero evitando que se derrame el agua tras llenarse el tanque.

Además de sistemas automáticos en

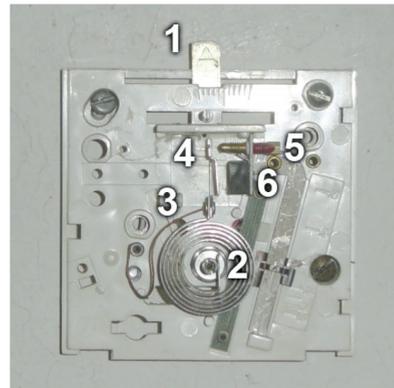


FIGURA 3. TERMOSTATO formado por una espiral bimetalica que se enrosca y desenrosca al calentarse y enfriarse, cerrando y abriendo un circuito eléctrico que abre y cierra la válvula de gas de un calentador. Imagen tomada de https://en.wikipedia.org/wiki/File:WPThermostat_new.jpg (Leonard G. at English Wikipedia.derivative work: Raeky (talk) - WPThermostat.jpg, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7804448>)

nuestros mecanismos, hay sistemas de control en nuestro cuerpo. Así, si nos falta agua sentimos sed y tomamos líquidos, si hacemos ejercicio, sudamos y la evaporación del agua en nuestra piel la enfría, si hace frío, los vasos sanguíneos que irrigan nuestra piel se cierran para evitar perder energía y mantener la temperatura de nuestro cuerpo.

En general, la retroalimentación negativa logra estabilizar sistemas que de otra manera serían inestables.

Retroalimentación positiva

Seguramente, de niño participó en juegos como *póngale la cola al burro*, en que le vendaban los ojos para que usted no supiera dónde colocarla. Ante cada movimiento sus amigos le decían *frío* para indicarle que el movimiento lo alejaba de su meta o *caliente* para indicarle que se acercaba. Imagine un juego similar, pero en el que sus amigos bromistas en lugar de guiarlo con retroalimentación negativa le aplauden cada paso que lo aleje de su meta con tanto entusiasmo que usted avanza cada vez más rápido con pasos más grandes. Considere una canica que rueda en el interior de un plato hondo en forma de una semiesfera. Conforme la canica se aleja del centro, la fuerza de gravedad y la fuerza de contacto con el plato la empujarían de regreso al centro. Mientras más alejada, más grande sería la fuerza que la empuja de regreso. La canica terminará descansando en el fondo del plato, un punto de equilibrio estable. Pero ¿qué pasaría si volteamos el plato de cabeza? Entonces, al alejarse del centro en cualquier dirección, la canica estaría sujeta a una fuerza que la alejaría aún más. El sistema sería *inestable* (Fig. 4).

Imagine un gas inflamable que escapa de un tanque mal cerrado. Si acercara la flama de un cerillo (¡no lo haga!) calentaría algunas de sus moléculas y del oxígeno en el aire hasta sobrepasar su *barrera de activación*, permitiendo que se lleve a cabo una reacción química en que algunas moléculas combustibles se oxidan, liberando energía en este proceso *exotérmico*. Esta energía ayudaría a oxidar a moléculas vecinas, liberando aún más energía y permitiendo que se oxiden aún más moléculas. Con más y más moléculas reaccionando y más y más energía liberada, este proceso no puede terminar más que en una violenta explosión. Considere un mercado eficiente. Si un vendedor aumenta el precio de sus productos, sus posibles clien-

tes irían a comprar al puesto de al lado haciéndole perder dinero. Eso lo obligaría a bajar sus precios (Ref. [4]). En un entorno de competencia, los precios tienden a estabilizarse en un nivel justo. Pero considere ahora a un vendedor muy rico que baje sus precios de venta por abajo de sus costos, sin importarle perder dinero en cada venta. Todos preferirían comprarle a él, quebrando a sus competidores y dejándolo como vendedor único. Entonces podría comprar los puestos de sus competidores para después subir los precios arbitrariamente, recuperando sus pérdidas iniciales; los clientes tendrían que comprarle a él, pues ya no habría otros. Con una mayor fortuna podría dominar nuevos mercados y eventualmente dominar todo el comercio del país o del mundo. Para evitar esto, existen *leyes* anti-monopolios, pero en un descuido, este vendedor podría hacerse tan poderoso como para sobornar a los reguladores y financiar a los legisladores, logrando primero burlar y luego cambiar las leyes (ref [5]). Dinero y poder conducirían a más dinero y más poder, en un ciclo de retroalimentación positiva que haría al sistema inestable y quizás inmodificable, hasta que el hartazgo conduzca a una violenta revolución. Así como la retroalimentación negativa conduce a sistemas estables, la retroalimentación positiva conduce a inestabilidades y explosiones, físicas, químicas o sociales.

Cambio climático

Nuestro planeta es iluminado por el Sol del que recibe aproximadamente mil watts de potencia luminosa visible sobre cada metro cuadrado (ref. [6]). Esta energía calienta a la Tierra, la cual radia hacia el frío espacio exterior luz invisible, infrarroja, enfriándose. El equilibrio entre la radiación que escapa al espacio y la que recibimos del Sol determina en gran medida la temperatura en la superficie. Sin embargo, en la atmósfera hay moléculas como el CO₂ que son transparentes a la luz visible, pero opacas a la luz infrarroja, impidiendo que llegue al espacio exterior, y radiándola de regreso a la superficie, aumentando más su temperatura. La humanidad ha contribuido significativamente al incremento en la cantidad de gases de efecto *invernadero* en nuestra atmósfera a partir de la revolución industrial. El consecuente aumento de la temperatura provoca que el hielo de los glaciares, de las cumbres nevadas y de las regiones polares se derrita. El hielo es blanco pues espesce eficientemente la luz visible.



FIGURA 4. UNA canica que rueda en el interior de un plato semiesférico llega a un punto de equilibrio estable en el centro (izquierda), mientras que si rueda en el exterior del mismo plato se aleja aceleradamente del ahora inestable centro (derecha).

Al haber menos hielo, hay menos luz circular, aunque su auto no lo haga, absorbita. Esto provoca mayor calentamiento que provoca que más hielo se derrita. Además, al derretirse el hielo, se liberan gases atrapados en el mismo, como metano, que es otro gas de efecto invernadero. Este es un ciclo de retroalimentación positiva que vuelve aún más inestable el clima, como hemos podido atestiguar en los últimos años y días.

Ciencia

En la antigüedad, grandes e inteligentes filósofos trataban de entender nuestro mundo pensando. La revolución científica se inició al darle valor a la observación (ref. [7]). Se observan fenómenos naturales, se elaboran hipótesis, se buscan las consecuencias derivadas de dichas hipótesis y se confrontan con experimentos bien planeados y llevados a cabo cuyas consecuencias pudieran en principio falsear las hipótesis. Cada paso en falso es rectificado por algún experimento que desmiente la hipótesis. De esta manera, la Ciencia ha sido ideal para *eliminar rápidamente las malas ideas*. La retroalimentación negativa derivada de experiencias que contradicen las hipótesis equivocadas, conduciendo a su eliminación, ha permitido la rapidísima evolución del conocimiento de nuestro universo. La búsqueda continua de experimentos cuyo resultado pueda contradecir una hipótesis y el escepticismo ante nuevas hipótesis aventuradas que no estén firmemente sustentadas en la experiencia, esta actitud *conservadora* que parecería frenar el desarrollo de la ciencia, en realidad es un sistema de retroalimentación negativa que ha permitido su avance sólido y sus espectaculares repercusiones.

Ciencia y sociedad

Los gobernantes deben tomar decisiones continuamente para resolver los problemas que afectan a la ciudadanía. En muchas ocasiones, estas se deben tomar sin tener suficiente información a mano. Por ejemplo, a principio de los noventa se implementó en la Ciudad de México el programa Hoy No Circula (HNC), con la intención de disminuir la contribución de los automóviles a la contaminación del aire (ref. [8]). Sin embargo, la gente debe circular, aunque su auto no lo haga, y para ello puede recurrir a un segundo auto viejo o a pedirle aventón a un familiar o conocido. Por ello, no es obvio *a priori* que la contaminación disminuya por evitar que otros gases de efecto invernadero dejen de circular. Un gobernante con *cultura científica* hubiera *medido* las emisiones vehiculares, el consumo de gasolina y el uso del transporte público antes y después de implementar el programa para saber si fue exitoso, y lo hubiera cancelado y hubiera buscado alternativas de no haberlo sido. Resulta que hay mediciones que muestran que el programa fue contraproducente: el consumo de gasolina y la contaminación se incrementaron y el uso del transporte público disminuyó. Sin embargo, el HNC ha cumplido más de tres décadas a pesar de su inutilidad... y seguirá. Otro ejemplo fue la pandemia de Covid19. Recientemente se hizo una evaluación de las decisiones tomadas (ref. [9]) y... el gobierno las tiró a la basura por considerarlas parte de un complot de la oposición conservadora, sin aprender lección alguna.

Gobierno
Afortunadamente, en las sociedades modernas, hay un sistema de contrapesos que permite evaluar y corregir las decisiones o las propuestas de los gobernantes. Hay un *poder ejecutivo* que toma decisiones y en ocasiones propone nuevas leyes. Hay un *poder legislativo* que representan a todos y que discute las propuestas de leyes, analiza sus ventajas y desventajas y las suele enmendar, ciñéndose a un estricto procedimiento para su aprobación. Hay además un *poder judicial* que analiza la consistencia mutua entre las distintas leyes y revierte las de menor jerarquía que contradigan a las de mayor jerarquía. Estos son mecanismos de retroalimentación negativa que permiten estabilizar los avances de un país. Un dictador en un régimen autoritario puede tomar decisiones de una manera más ágil y veloz que un presidente en una democracia moderna, pero al no tener contrapesos, comete errores que nadie se atreve a señalar y que suelen conducir a una hecatombe social. Un relleno

sanitario en una zona de recarga de acuíferos puede ser barato y resolver un problema urgente, pero conduce a un problema de salud mayúsculo. Un tren sobre un suelo cárstico lleno de cavernas que alberga acuíferos, también. La Historia tiene muchos ejemplos de poderosos dictadores que eventualmente cometieron errores que los acabaron. En cambio, un presidente en una democracia moderna tiene que convencer a los poderes legislativo y judicial para que le permitan realizar cambios, los cuales se llevan a cabo de manera lenta y quizás torpe. Las obras que emprenden deben ser evaluadas antes por ingenieros y científicos, tras estudios serios de viabilidad y de impacto ambiental, procesos que suelen tomar tiempo y aparentemente provocan retrasos. Sin embargo, la retroalimentación negativa a la que está sujeto el gobernante le evita cometer grandes errores conducentes a inestabilidades y tragedias. Afirmaba Churchill que la democracia es el peor sistema de organización social... exceptuando a todos los demás.

Elecciones

Probablemente el lector conozca algún país en el cual el partido del gobernante tenga mayoría en las cámaras legislativas, en que los legisladores prefieren aplaudir iniciativas presidenciales y aprobarlas sin leerlas y *sin cambiarlas una coma*, en el que se ataque a todas las instituciones autónomas que prevean las consecuencias de las decisiones tomadas y ofrezcan retroalimentación que permita corregirlas, en el que cualquier crítica se interprete como un ataque concertado por una gran conspiración opositora y se responda con ataques *ad hominem*. En estos países queda, a veces, un mecanismo de retroalimentación que permite corregir el rumbo: las elecciones que permiten votar por los candidatos que muestran mayor interés en defender a la sociedad que al gobernante en turno. En algunos países, este es el único mecanismo de retroalimentación vigente, y en un descuido, lo pueden perder. Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por DGA-PA-UNAM mediante el proyecto IN109822.

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.

FIGURA 1. (A) El autor sobre una bicicleta que cae hacia su izquierda intenta balancearla dando vuelta a la izquierda. **(B)** El autor trata de balancear su peso apoyado en un solo pie mediante la contracción y relajación de los músculos de su pierna. **(C)** El autor balancea una escoba sobre la punta de su dedo mediante movimientos de éste.



ESTA PUBLICACIÓN FUE REVISADA POR EL COMITÉ EDITORIAL DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

PARA ACTIVIDADES RECIENTES DE LA ACADEMIA Y ARTÍCULOS ANTERIORES PUEDE CONSULTAR: WWW.ACMOR.ORG.MX
¿COMENTARIOS Y SUGERENCIAS?, ¿PREGUNTAS SOBRE TEMAS CIENTÍFICOS? CONTACTANOS: EDITORIAL@ACMOR.ORG.MX

REFERENCIAS

1. The Backwards Brain Bicycle - Smarter Every Day 133, <https://www.youtube.com/watch?v=MFzDaBzBIL0>.
2. Centrifugal governor - Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal_governor
3. Bimetallic strip - Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Bimetallic_strip
4. Robert L Heilbroner, The Worldly Philosophers: The Lives, Times, and

Ideas of the Great Economic Thinkers (Touchstone, 1999).

5. Cory Doctorow, Lina Khan vs. Amazon, The New York Times <https://www.nytimes.com/2023/09/27/opinion/amazon-ftc-antitrust-monopoly.html>
6. Lawrence M. Krauss, The Physics of Climate Change, (Apollo, Londres, 2021).
7. Lars-Göran Johansson, Philosophy of Science for Scientists (Springer, New York, 2016).
8. W. Luis Mochán, Hoy mi coche no circula, La Unión de Morelos, junio 23, 2014, pp. 36 y 37 <https://acmor.org/articulos-antiguos/hoy-mi-coche-no-circula>
9. Jaime Sepúlveda et al., Informe de la Comisión Independiente de Investigación sobre la pandemia de COVID-19 en México: Aprender para no morir (COMESCO, 2024) <https://www.comesco.com/wp-content/uploads/2024/05/Informe-Comision-Independiente.pdf>