



Retroalimentación y sincronía en procesos

Esta reseña presenta los principios de la retroalimentación y la sincronía, los cuales son relevantes para explicar el comportamiento de los seres vivos y de las máquinas, según la modalidad de pensamiento de Wiener. Con ejemplos de diversas disciplinas, se muestra la necesidad e importancia de dichos principios para mantener una organización efectiva y en equilibrio de los sistemas dinámicos complejos, independientemente de su naturaleza. Este hecho justifica el interés de los investigadores que buscan nuevos fenómenos explicables en este contexto, y también de los ingenieros, porque buscan diseñar máquinas que emulen fenómenos naturales y evolutivos a través de la retroalimentación y la sincronía.

Introducción

La palabra *cibernética* proviene del griego *kybernētiké*, que se refiere a la acción de timonear un velero. Fue propuesta por el científico Norbert Wiener en 1947 como una modalidad de pensamiento para explicar el comportamiento de los seres vivos y de las máquinas mediante el uso de los dos principios fundamentales de todo sistema cuando se trabaja en condiciones normales y de armonía. Dicho pensamiento evidenció que la retroalimentación, la predicción y la sincronización están presentes en los seres vivos, la naturaleza, la sociedad y las máquinas, ya que estos principios son necesarios e indispensables para mantener una organización efectiva y en equilibrio para los sistemas dinámicos no lineales y complejos.

Wiener analizó estos conceptos ampliamente y con una gran visión del futuro en su libro *Cibernética: o el control y la comunicación en el animal y la máquina* (Wiener, 1948). Éstos sentaron las bases para el desarrollo y la consolidación de la ciencia de la información en la segunda mitad del siglo XX y lograron, además, una





formalización científica de la ingeniería en el diseño de máquinas y dispositivos con capacidad de medir, transmitir información y aprender a autoorganizarse, de manera similar a como lo hacen los seres vivos. Es así como se han desarrollado herramientas abstractas, llamadas algoritmos, para analizar o diseñar, en general, sistemas automáticos complejos adaptables en condiciones de regulación, de sincronía e inclusive de autodiagnóstico ante fallas, vía los principios de retroalimentación y de autoorganización.

Como un pequeño homenaje a Wiener, esta reseña introduce los principios básicos que se programan en un *chip*, o circuito integrado, que hace a las nuevas máquinas muy flexibles y capaces de emular el comportamiento de los seres vivos. Se pretende clarificar los conceptos de *retroalimentación* y *sincronía*, y analizar algunos de los logros alcanzados al explotar ambos principios fundamentales en la cibernética para el diseño de dispositivos y sistemas adaptables autoorganizados con alta capacidad logística, que la mercadotecnia denota simplemente como *smart* —sin que sean realmente inteligentes— por hacer una analogía con la capacidad del ser humano.

Muchos dispositivos tecnológicos se han vuelto de uso cotidiano dentro de la sociedad debido a un bajo costo y a la simplicidad de su uso. Se podrían mencionar las máquinas de impresión, los teléfonos, las cámaras fotográficas y de cine, las aeronaves, los audífonos, los sistemas de refrigeración, los controles remotos, etc. La sociedad moderna maneja con familiaridad dichos dispositivos; a simple vista parece que nos hemos convertido en fotógrafos, pilotos, astronautas, impresores, barrenderos, porteros, etc., por el simple hecho de dar órdenes al oprimir botones, pero sin comprender qué

los hace capaces de ofrecernos los servicios de manera automática. Estos equipos se han convertido en herramientas flexibles generalizadas de trabajo e integradas a la sociedad del siglo XXI a tal grado que inclusive hablamos con los dispositivos y les otorgamos particularidades similares a las de los seres vivos. Sin embargo, pocos se preguntan: ¿qué procesos se llevan a cabo, internamente, en las máquinas y los dispositivos para que parezcan ser inteligentes y tengan una gran aceptación?

El prefijo *ciber-* es usado por la sociedad actual —lamentablemente— para denotar lo relacionado con la tecnología moderna, pero sin entender realmente qué hay detrás y sin preguntarse: ¿qué tienen los nuevos equipos, comparados con los de nuestros ancestros, que los hace flexibles, universales y con servicios superiores?, ¿de qué se les ha dotado para que respondan en cierto sentido como seres vivos y, además, tengan la capacidad de organizarse de forma similar a una sociedad desarrollada o de sincronización, a la manera de las luciérnagas para emitir un centelleo rítmico?

Retroalimentación, fenómeno natural

El acto cognitivo de un ser vivo consiste en llevar a cabo acciones vía un procesamiento de información, a partir de su percepción, experiencia y subjetividad. Esto es factible dado que los organismos tienen la capacidad de almacenar, recuperar, reconocer, comprender, organizar y usar la información proveniente de sus sentidos. Dichas acciones constituyen una característica central de la vida en condiciones normales; son generadas por organismos dinámicos que se comunican, de tal manera que cada una de ellas influye en los demás, lo cual forma un ciclo interconectado llamado cadena retroalimentada.

El término *retroalimentación* se refiere, en forma general, a una situación en donde dos o más sistemas dinámicos se comunican, de tal manera que cada sistema influye en el otro y, por lo tanto, sus dinámicas están acopladas. En el contexto de un modelo recursivo, la retroalimentación está siempre presente, dado que una acción o variable en una recursión depende de otras pasadas y, asimismo, las siguientes dependerán de las actuales.

Un sistema retroalimentado toma en cuenta la información de acciones pasadas y, con base en ellas, decide las acciones subsecuentes; se crea así una estructura causal circular en donde el tiempo es la variable independiente.

Una forma de visualizar el principio de la retroalimentación es considerando un sistema con dos elementos, D1 y D2, interconectados en ciclo, de tal manera que D1 influye en D2 y éste, a su vez, influye en D1. En consecuencia, el comportamiento del sistema está siempre gobernado por las reacciones y los tiempos de respuesta de ambos elementos.

En la Figura 1, mediante un diagrama de bloques, se muestra la idea de la retroalimentación de dos sistemas en donde el bloque sistema dinámico D1 es excitado por causas exógenas (U_s) que afectan su comportamiento, y se producen efectos (Y_s). Parte de dichos efectos (U_r) son causas del sistema D2, el cual responde rápidamente provocando acciones retroalimentadas (Y_r) que, posteriormente, excitan al sistema D1. Cuando se llevan a cabo tareas de regulación con un esquema retroalimentado, para compensar los disturbios que afectan al sistema D1, el sistema D2 debe responder rápido; de ahí el ícono de una liebre en el bloque D2, en comparación con el sistema D1, que está identificado con una tortuga.

Los sistemas biológicos hacen uso de la retroalimentación en una cantidad extraordinaria y en formas muy ricas de organización. Así, las cadenas retroalimentadas ejecutan tareas distintas en todos los niveles, desde la interacción de las proteínas en las células, hasta el acoplamiento de organismos en un ecosistema complejo, como es la vida en la selva. La retroalimentación permite gobernar la forma de caminar, de responder al

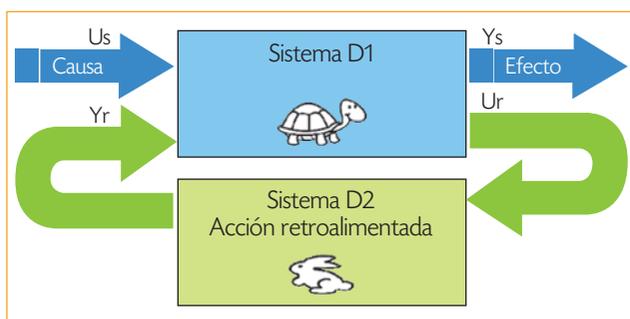


Figura 1. Esquema retroalimentado básico.

estrés y a los retos; regula factores como la presión sanguínea, el nivel del colesterol, la glucosa en la sangre o la temperatura corporal, etcétera.

La neurofisiología concibe al sistema nervioso central como un proceso retroalimentado de múltiples elementos, que interactúan con los músculos y cuya información reingresa de nuevo al sistema nervioso a través de los órganos sensoriales; esto da lugar a un organización compleja y no divisible.

Por lo que respecta a los ecosistemas y el entorno social, también éstos están formados por múltiples esquemas retroalimentados, esenciales en la vida del conjunto como un todo, y que solamente son capaces de operar masivamente cuando existe un apropiado balance entre las fuerzas que provocan cambios, vía una retroalimentación positiva, y las que proporcionan estabilidad, vía una retroalimentación negativa.

Los sistemas naturales, ya sean biológicos o ecosistémicos, tienen un flujo de información grandioso, inimaginable; así como patrones de comportamiento muy intrincados que hacen que actualmente no se cuente con metodologías de estudio rigurosas con las cuales se puedan descubrir y explotar las características y estructuras matemáticas de interconexión de los elementos del sistema complejo para su análisis como un todo. Este problema es uno de los retos de las ciencias naturales del siglo XXI y ha sido génesis de grupos de científicos con intereses en matemáticas, biología y ciencias sociales, quienes lo abordan de una manera interdisciplinaria.

Por lo que respecta a los ejemplos de sistemas inventados por el hombre, el termostato es un dispositivo tecnológico temprano que opera bajo el principio de la retroalimentación negativa. Éste actúa a partir de una temperatura deseada, indicada en la perilla. Si la temperatura del cuarto está por debajo de lo establecido en el indicador, se activa el elemento que disminuye el aire frío para que la temperatura suba hasta el nivel deseado de manera lenta; si, por el contrario, la temperatura está por arriba de la deseada, el regulador aumenta la cantidad de aire frío o se interrumpe el flujo de aire caliente. De este modo, la temperatura oscila alrededor del valor indicado.

El mismo proceso se lleva a cabo en el ser humano con ayuda del hipotálamo, que hace las veces de



termostato porque mantiene el equilibrio entre la producción y la pérdida de calor en el cuerpo con la sudoración y el temblor corporal producido por un descenso de la temperatura.

También en el entorno social se encuentran esquemas retroalimentados en los grupos interpersonales como las redes sociales, las parejas matrimoniales, las familias, las relaciones psicoterapéuticas o incluso internacionales, ya que los miembros de dichos grupos se comunican entre ellos y la conducta de cada persona influye en la de las demás y es, a su vez, afectada por aquéllas.

Dentro de los sistemas diseñados por el hombre, en los que sería imposible su operación sin involucrar miles de esquemas retroalimentados, está la red de energía eléctrica de una región. En este caso, se desea satisfacer la demanda de voltaje y frecuencia constante de manera continua y, para ello, los actores dinámicos involucrados son: los diversos tipos de fuentes de generación de energía, las redes de distribución y los usuarios cuyo consumo de electricidad varía de forma continua. No obstante, se puede decir que a pesar de la complejidad de las redes eléctricas, éstas están lejos de ser robustas y de mantener la operación en condiciones tan variadas como lo hacen los sistemas biológicos.

También los esquemas actuales de la producción y el consumo explotan los ciclos retroalimentados para mejorar la economía como un todo. La Figura 2 muestra la cadena dinámica de comunicación propuesta por Forrester en 1961, en la cual los actores interactúan con al menos otro de ellos y en donde es evidente que

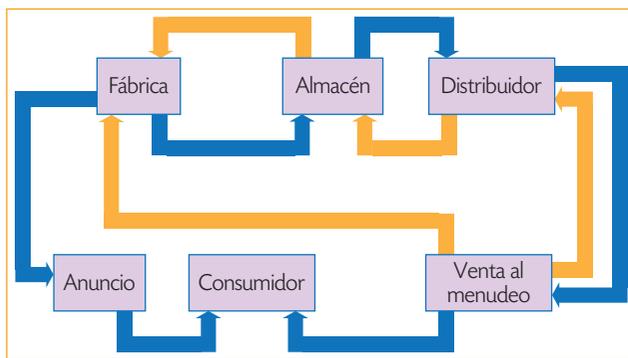


Figura 2. Cadena dinámica de suministro en donde los agentes con múltiples ciclos tratan de mantener el nivel del inventario en un mínimo. La mercancía fluye del productor al consumidor, vía la cadena de distribución y venta al menudeo.

ninguno puede subsistir de manera aislada y se requiere de la comunicación entre todos ellos para que el sistema sea eficiente como un todo.

La robótica y el diseño de máquinas inteligentes son disciplinas que resultaron de las ideas de Wiener. Fueron desarrolladas a partir de los años cuarenta del siglo XX, cuando se acuñó el término *inteligente* para denotar la gran flexibilidad de respuesta de los dispositivos modernos ante muy variadas circunstancias. Estas máquinas llamadas humanoides son posibles gracias a un nivel significativo de esquemas retroalimentados y a la miniaturización de los componentes electrónicos y mecánicos que los conforman. En los últimos años, el éxito y avance de estos campos lo demuestran:

- Los exploradores *Rovers* que llegaron a la superficie de Marte y se mantuvieron en operación por más de cuatro años, teniendo comunicación con la Tierra y enviando mediciones e imágenes del planeta.
- El robot *Da Vinci*, desarrollado por la empresa estadounidense *Intuitive Surgical* y aprobado en el año 2000 por la FDA (Food and Drug Administration, Agencia de Alimentos y Medicamentos) de Estados Unidos, el cual perfecciona los movimientos del cirujano para hacer más segura la cirugía.

A pesar de los avances de la robótica y la inteligencia artificial, aún es necesario mejorar el manejo de imágenes, desarrollar instrumentos que permitan medir y actuar de forma más flexible para lograr que en ciertas condiciones tengan más similitudes con los seres vivos. El problema de la autosuficiencia, desde un punto de vista de la energía, también representa un reto para la ingeniería.

Quizá una de las áreas en donde las ideas de Wiener han fructificado de manera notable es la de redes de cómputo y sistemas computacionales. Disponer del sistema retroalimentado más grande y complejo diseñado por el hombre, como lo es internet, ha cambiado la forma de comunicación de la sociedad y la distribución de la información; sin embargo, a pesar de ello todavía hay retos por vencer. Uno de los principales problemas es la desestabilización de la red por las múltiples perturbaciones que se pueden presentar, incluidas aquéllas que han sido provocadas maliciosamente. La gran can-

tividad de nodos activos y la rápida velocidad de respuesta de una red obligan, entonces, a proponer esquemas que sean capaces de tomar decisiones rápidas, basadas en la información local y que traten de reducir los retardos en el flujo de la información dentro de los ciclos.

Por otro lado, existen aplicaciones innovadoras e importantes del principio de la retroalimentación que están presentes en los instrumentos empleados en la biología, astronomía y física en general; prueba de ello son el espectrómetro de masas y los grandes telescopios.

Pese al maravilloso principio de la interconexión de los sistemas en forma retroalimentada, hasta hace más de medio siglo cada disciplina estudió de manera independiente el fenómeno de la retroalimentación, sus propiedades y los efectos de acoplamiento entre los elementos, lo cual provocó una demora para el conocimiento global de la ciencia. Hoy se reconoce en todas las ciencias que las principales ventajas de la retroalimentación son:

- La capacidad para manejar incertidumbres y perturbaciones.
- La posibilidad de modificar la dinámica global de un sistema y alterar el comportamiento para cada aplicación.

También, en el medio científico es sabido que un mal ajuste o daño en los elementos que conforman el ciclo provoca la desestabilización del sistema. Un ejemplo tecnológico común de inestabilidad con una retroalimentación positiva es el zumbido que se escucha en los altavoces cuando el factor de amplificación del micrófono es demasiado grande. En este caso, el ruido que registra el micrófono en una sala de conciertos es amplificado y emitido por las bocinas; ya amplificado, éste es registrado nuevamente por el micrófono y otra vez amplificado; y así sucesivamente, lo cual provoca el zumbido que irrita.

Apenas hace 70 años, Wiener le abrió los ojos a la sociedad y mostró la relevancia de estudiar las múltiples formas de operación de los sistemas retroalimentados en beneficio de entender mejor a los seres vivos, la naturaleza y la sociedad, para así, además, poder construir máquinas que emulen sistemas naturales y sociales complejos. Este pensamiento ha mostrado su robustez y



capacidad de adaptación ante disturbios y fenómenos muy variados a lo largo de nuestra existencia. Hoy en día se sabe que el principio de la retroalimentación es simple, está basado en la corrección entre lo deseado y el desempeño actual, y se ha redescubierto y hecho patente en múltiples formas. La razón de su notable desempeño se debe a que es robusto ante incertidumbres o perturbaciones de los elementos que forman el ciclo. Esto se explica porque, al aumentar el error entre lo deseado y lo actual, debido a las perturbaciones, el sistema global tiende a autorregularse si las acciones de control son moderadas y se ajustan en función del factor de amplificación y velocidad de respuesta de cada actor dentro del ciclo.

Entonces, se puede decir que los autómatas creados por el hombre están conectados al mundo externo para la recepción de impresiones y eventos, para realizar actos. Para ello disponen de órganos sensoriales, efectores y el equivalente a un sistema nervioso central integrador de la transferencia de información entre unos y otros.

Los ejemplos antes indicados ponen en evidencia que los seres vivos, la naturaleza, la sociedad y las máquinas operan usando en múltiples formas el principio de la retroalimentación o interacción en ciclo. Incluso las catástrofes naturales y sociales, como las guerras, se pueden estudiar y entender como un desbalance de las fuerzas de estabilización compensatorias con una



retroalimentación negativa, y las fuerzas del cambio de tendencia, con una positiva. Entonces, resulta fundamental para el avance y el bienestar, en términos generales, adoptar formas de actuar en el entorno que nos lleven a establecer puntos de equilibrio en los sistemas sociales, económicos, políticos, e inclusive en los ecosistemas.

● Sincronía, fenómeno inevitable

De manera similar a la retroalimentación, la sincronización es un fenómeno natural, espontáneo e inevitable para el desarrollo de los seres vivos, la naturaleza y las máquinas, y puede considerarse una maravilla de la evolución. La palabra tiene diferentes acepciones derivadas de la física y de la filosofía, mas se refiere a la coincidencia en el tiempo o simultaneidad de los hechos. El dispositivo creado por el hombre –quizá el más antiguo– para estudiar el fenómeno de la sincronización es el reloj de péndulo. Christiaan Huygens observó que cuando dos relojes de péndulo se ponían cerca, ambos oscilaban en sincronía, sin importar cómo empezara la oscilación. La misteriosa “simpatía” entre los relojes desaparecía cuando se alejaban. Es decir que, bajo ciertas circunstancias, existen relaciones entre los cuerpos –en este caso, la distancia entre ellos– en que la acción de uno induce el mismo comportamiento en el otro.

El fenómeno de sincronización es ubicuo y está presente en las órbitas de los cuerpos celestes, los electro-

nes, en la música y el zumbido de los grillos. A pesar de este hecho, no es obvio visualizar que está en todo el universo, es decir, en todo sistema donde los elementos que lo forman logran un efecto de autoorganización de manera coherente, con cierta armonía. Fenómenos como el destello sincronizado con ritmo de las luciérnagas, sin ser inteligentes y sin la necesidad de un coordinador, son claras evidencias de que la sincronización es algo natural y que emerge ante ciertas circunstancias, si se entiende la palabra *emergente* como un fenómeno cualitativo de cambios generados de forma espontánea dentro de un sistema.

La sincronización se alcanza si existe una relación fija entre instantes de tiempo correspondientes a dos o más señales y se logra a través del movimiento colectivo y ordenado de los elementos de un sistema. En otras palabras, la sincronización surge a partir de la dinámica de los elementos constitutivos de un sistema. Justamente, este comportamiento ordenado es el que genera la sincronización y permite al conjunto desempeñar funciones simples o complejas sin la necesidad de un líder (Strogatz, 2003).

Un pequeño oscilador, un conjunto de metrónomos que ajustan su compás con otros miembros en un entorno y ciertas condiciones de disparo son suficientes para que emerja la sincronía de manera análoga, como lo que hacen los músicos al ejecutar una pieza de manera acoplada sin un director o líder.

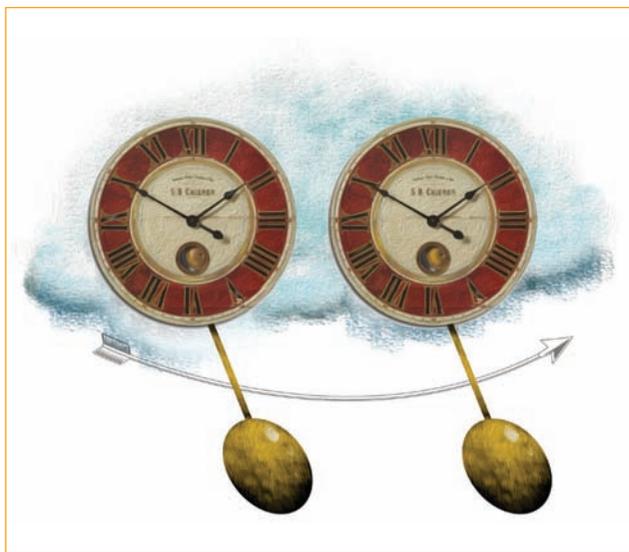


Figura 3. Simpatía entre relojes pendulares.



A partir de los años ochenta del siglo pasado, se han estudiado los patrones de sincronización para buscar propiedades globales en el marco de sistemas no lineales, y se han usado las ideas novedosas del caos que pueden ser aplicadas a la física, la biología, la medicina, la economía, la lingüística y a otras muchas disciplinas del saber humano (Braun, 1996). Es así como diversas áreas convergen y buscan explicar fenómenos con ayuda de herramientas matemáticas y de sistemas dinámicos no lineales. Actualmente se ha reconocido que el fenómeno de la sincronización tiene las siguientes propiedades:

- Es global y ubicuo, porque está presente en todos los lugares.
- Es estable, ya que es capaz de generar armonía en los movimientos de los diferentes elementos de un conjunto.
- Es colectivo, debido a que requiere la interacción y comunicación, al menos entre dos o más elementos del grupo.
- Existen movimientos ordenados tanto en los sistemas regulares como en los caóticos, dado que ambos tienen un patrón.

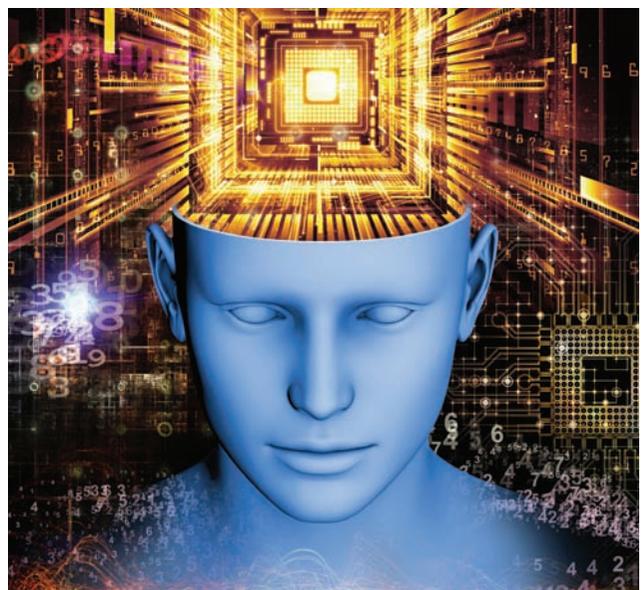
En los sistemas biológicos hay un variado tipo de ritmos asociados a los relojes biológicos. La sincronización está presente en las células, lo que permite el latido del corazón, el ritmo del sueño, etcétera.



Un acto cognitivo implica la coordinación de numerosas regiones neuronales, coordinación basada en la formación transitoria de grupos de neuronas que crean lazos dinámicos sincronizados en sus fases; es decir, las señales generadas por las neuronas dentro del grupo suben y bajan de manera simultánea. Esta sincronía de fases crea la coherencia y la unidad para producir oscilaciones y la sincronización en distintas zonas del cerebro, como si fueran instrumentos musicales.

En general, la naturaleza es un sistema en armonía y está formada por miles de sistemas sincronizados. Lamentablemente se han reportado recientemente estudios que muestran que la sincronía se está perdiendo en los ecosistemas debido al aumento de la temperatura en primavera, pues en las especies ha desaparecido su sincronía.

Una muestra de la importancia y necesidad de la sincronía es la insuficiencia cardiaca avanzada que presenta alteraciones en la conducción intraventricular y ocasiona una asincronía en la contractilidad normal del ventrículo, que deteriora la función cardiaca. Dentro de las opciones terapéuticas para la insuficiencia cardiaca, que cada vez adquieren un papel más importante, está la que utiliza células madre para regenerar tejido dañado en el corazón y restablecer el bombeo sincrónico. Es decir, se propone una estrategia de *resincronización biológica*, en la cual las células madre reparan el músculo dañado del corazón para restablecer el





movimiento cardíaco correcto, lo que hace más efectivos los dispositivos artificiales.

La sincronización de ondas cerebrales sostiene la memoria de objetos recién vistos, o sea que el reconocimiento de imágenes puede ser considerado también como una tarea de sincronía. Igualmente, en el área de la psicología existen estudios sobre la existencia del fenómeno de la sincronización. Además, en la neuropsicología aplicada existe una terapia llamada SHEC (sincronización de los hemisferios cerebrales) para sanar diferentes problemas psicológicos. Este proceso, detrás de la terapia, consiste en equilibrar los dos hemisferios cerebrales por medio de sonidos y ultrasonidos.

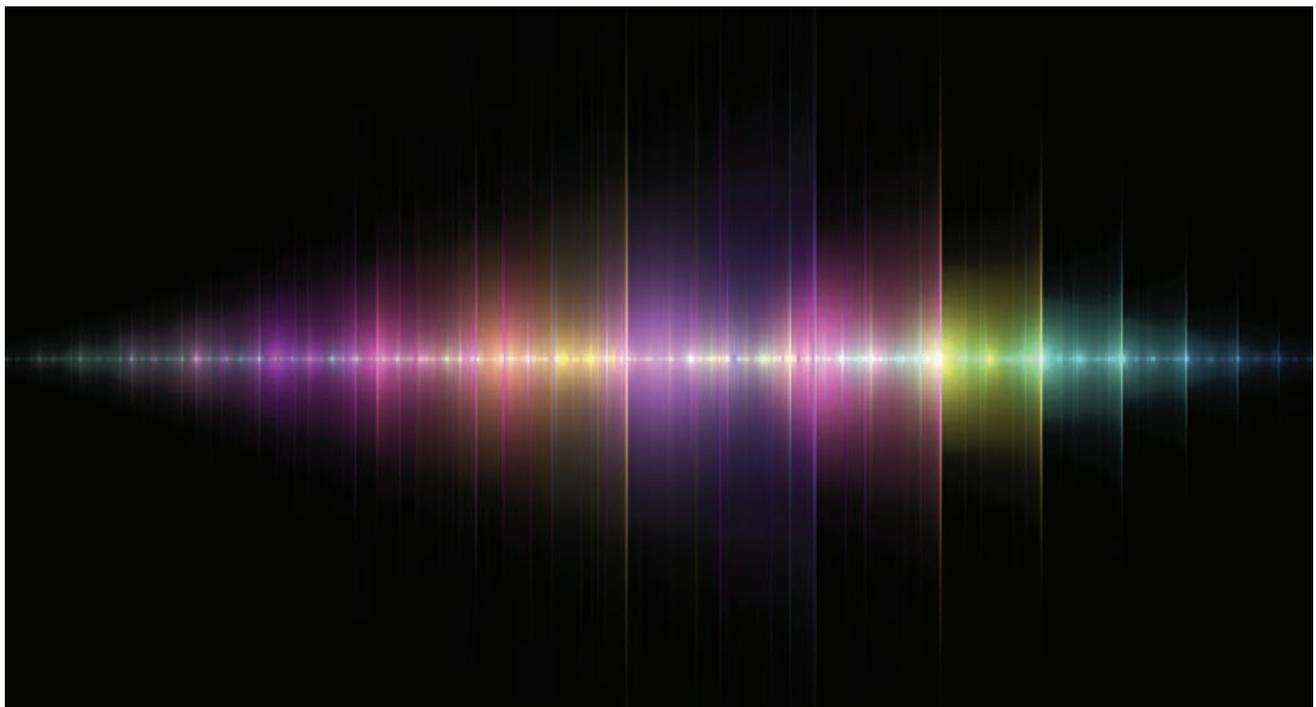
Al considerar a las máquinas, es quizá menos impactante el fenómeno de la sincronización; pero no deja de ser un gran logro la sincronía de sistemas de gran escala. Tal vez es porque lo que hace la tecnología es simplemente copiar el mecanismo que la naturaleza y los sistemas sociales han generado para estar en armonía y en paz. Pero entre las aplicaciones más evidentes de los sistemas sincronizados de gran escala creados por el hombre están los generadores de las redes eléctricas que oscilan todos a la frecuencia de la línea en una región y las redes digitales de comunicaciones. En esta última aplicación, la transferencia electrónica de datos

es viable gracias a los modelos de sincronización y consensos con señales de reloj y semáforos de tráfico que se ejecutan a la vez a grandes velocidades empleando un mayor número de canales.

Entre los investigadores de la aeronáutica y la robótica existe una gran inquietud, por lo que actualmente se dedican grandes esfuerzos a diseñar esquemas sincronizados que permitan la formación autónoma de ciertas configuraciones de desplazamiento en aeronaves no tripuladas, robots móviles y satélites, lo cual puede ser de ayuda para labores de rescate y seguridad.

Conclusiones

Se puede concluir que estamos lejos de explicar de qué forma se vincula a la retroalimentación y la sincronía con la evolución y el *homo sapiens*. Por lo tanto, las máquinas y los sistemas creados por el hombre que tienen capacidad de autoorganización son, aún, muy primitivos comparados con la evolución en la naturaleza. En la monografía de Larocca (2015) se analiza cómo la *Explosión creativa* hizo su aparición sorpresiva, instantánea y simultánea en todas partes hace 40 000 años. De ésta se llega a pensar que la naturaleza es como el cerebro, un sistema autoorganizado, y que la





ocurrencia del ciclo menstrual y del movimiento lunar pudieron haber sido los elementos catalizadores de la generación del arte. Resultado de éste y de muchos otros enigmas es el gran interés, por un lado, de los investigadores de las ciencias naturales, sociales y económicas, por mencionar algunas, que buscan nuevos fenómenos explicables en el contexto de los sistemas sincronizados y esquemas retroalimentados con rigor matemático y científico, y, por otro lado, el de los ingenieros y tecnólogos que buscan diseñar máquinas que emulen fenómenos naturales y de la evolución, como la sincronía, de manera tan perfecta como lo hace la naturaleza.

La autora agradece el apoyo parcial de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México (DGAPA-UNAM) y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) para poder realizar esta reseña.

Cristina Verde Rodarte es la primera mujer en haber obtenido el grado de doctora en Ingeniería Electrotécnica por la Universidad de Duisburg, Alemania, en 1983. Es autora de alrededor de 35 artículos de investigación en revistas de circulación internacional y más de 150 trabajos publicados en congresos internacionales y nacionales. Es investigadora en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México desde 1984 y miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde su fundación. Su interés principal es el diseño de esquemas de control, de diagnóstico y de supervisión automática para sistemas dinámicos.

verde@unam.mx

Lecturas recomendadas

- Braun, E. (1996), *Caos, fractales y cosas raras*, México, Fondo de Cultura Económica.
- Larocca, F. (2015), "La creatividad y la neurociencia". Disponible en: <http://www.academia.edu/3728405/La_creatividad_y_la_neurociencia>. Consultado el 29 de enero de 2015.
- Strogatz, S. (2003), *The Emerging Science of Spontaneous Order*, Hyperion Books.
- Wiener, N. (1948), *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Nueva York, Wiley & Sons.