Computadoras universales en nuestra vida diaria

Francisco Hernández Quiroz

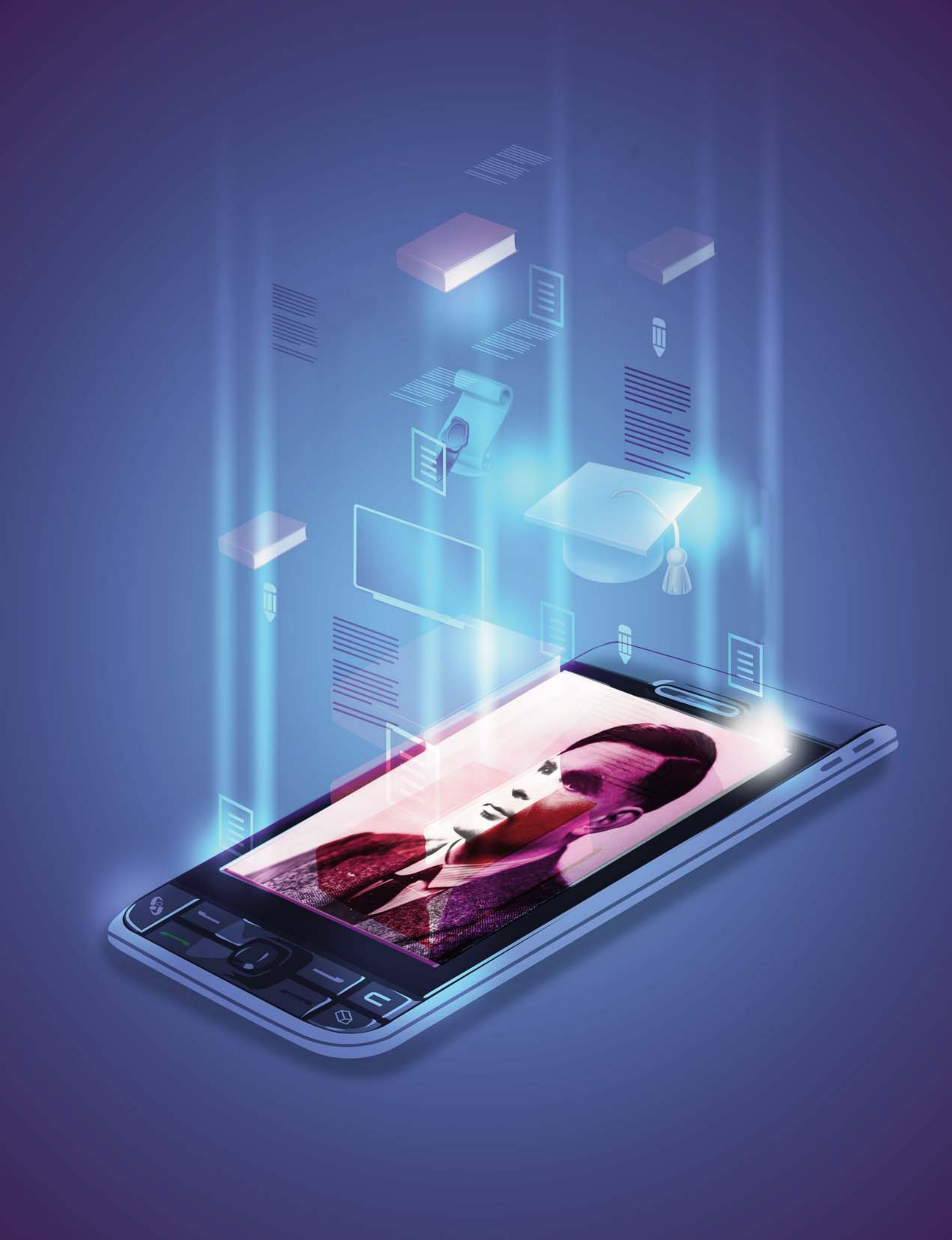
La máquina de Turing encarna el concepto básico de la computabilidad. Junto con la noción de máquina universal, constituyen el fundamento teórico de muchos de los avances tecnológicos que han revolucionado la actividad económica y la vida social de la humanidad en las últimas décadas.

Un signo distintivo de los grandes avances científicos es su capacidad para explicar fenómenos muy diversos y que se pensaban inconexos. Éste es sin duda el caso del análisis conceptual y matemático que Alan Turing realizó en un artículo de 1937, y que pasó inadvertido por algún tiempo. Ahí, Turing presentó un modelo acerca de qué significa resolver un problema por medio de un procedimiento *efectivo*, y lo utilizó para resolver un problema muy abstracto de lógica matemática. En su honor, el modelo se conoce hoy en día como "máquina de Turing", y es el fundamento no sólo de una rama de las matemáticas llamada *teoría de la computabilidad* (que estudia aquello que se puede calcular, en principio, por medio de una computadora), sino también de muchos avances tecnológicos presentes en todos los aspectos de nuestra vida actual.

Trataré de explicar a continuación dos conceptos centrales: qué significa "ser computable" y "tener capacidad computacional universal". Pero antes empezaré con un breve relato situado en un pasaje de la historia de México.

La Decena Trágica

En febrero de 1913, hace exactamente cien años, se produjo la última batalla militar dentro de los límites de la Ciudad de México: la *Decena Trágica*. En ese año, la presidencia de Francisco I. Madero se tambaleaba en medio de convulsiones



sociales, políticas y económicas. Un grupo de militares decidió aprovechar la situación para derrocarlo, y para ello atacaron el Palacio Nacional. Las cosas no salieron como planeaban, pues un sector del ejército se mantuvo fiel a Madero. Lo que siguió fue una serie de episodios de combate en las calles del centro de la ciudad. Finalmente, después de diez días, y de muchos muertos y penurias para la población civil atrapada en el conflicto, Madero fue asesinado y su lugar lo ocupó el general Victoriano Huerta.

Hasta antes de esto, la Ciudad de México no había sido escenario de combates mayores en la Revolución, y su infraestructura se encontraba más o menos intacta. Los periódicos de la capital habían seguido operando como siempre, e incluso el cine, llegado poco antes, se encontraba en auge. Por esta razón, la Decena Trágica fue narrada y fotografiada por los periódicos, y algunas acciones fueron filmadas por camarógrafos como los hermanos Alva y Salvador Toscano.

Imaginemos por un momento las peripecias de un reportero que cubría esos hechos. Acude a un enfrentamiento frente al Palacio Nacional y lo reporta a la redacción de su periódico por teléfono (con la esperanza de ganar la primicia). Más tarde, se sienta a escribir una crónica detallada en una máquina de escribir y, con ayuda de una cámara que un colega operó en el Zócalo, completa la crónica con fotografías (guardando una copia en su archivero). Piensa con envidia en la película grabada desde el segundo piso de un edificio por el dueño de una de las cámaras de cine recién llegadas al país, en la fidelidad de la grabación que permitía el nuevo invento. Decide después trasladarse a la Ciudadela a cubrir otro enfrentamiento y busca rutas alternas para llegar ahí en un enorme mapa que cuelga en los muros de la redacción (previendo bloqueos en las calles principales). Después de reportear 24 horas continuas, deja en su lugar a otro compañero y se va a casa, no sin parar antes en una cantina fuera del área de combate para tomarse un tequila mientras escucha un corrido improvisado sobre Madero y su pronta caída.

Al llegar a casa, agotado, cae dormido apenas se acuesta, y tiene un sueño muy extraño. En él, el fantasma de Madero aparece y le ofrece mostrarle lo que depara el futuro para él y sus descendientes. El reportero piensa que le hablará del destino democrático (o dictatorial) de México pero, en lugar de eso, el fantasma le muestra un aparato mágico que realiza todas las tareas de los "instrumentos de trabajo" del reportero y, además, también de los de diversión: es, a la vez, una máquina de escribir, un archivero, una calculadora y un teléfono. Contiene mapas precisos de toda la ciudad (y del resto del mundo) con fotografías detalladas de las calles y datos útiles sobre cómo llegar a ese lugar.

Barricada en el centro de la Ciudad de México. Imagen de una secuencia fílmica de Salvador Toscano durante la Decena Trágica.

También, puede llevar no una, sino miles de fotos, además de grabar películas (¡y reproducirlas!). Asimismo, le permite disfrutar de nuevo el corrido que escuchó en la cantina y ver un video del músico callejero que lo canta (¡antes de la invención del cine sonoro!). El aparato no es omnipotente; sin embargo, no puede darle un caballito de tequila.

El reportero está fascinado con la máquina pero, como suele ocurrir en los sueños, en el momento culminante en que puede tomarlo en sus manos y está a punto de usarlo, despierta. Abre los ojos con una sonrisa y piensa: "es imposible que exista algo así ni ahora ni en mil años".

Un viaje moderno

Rumbo a mi trabajo, viajando en el Metro, llevo mi propio aparato mágico: un teléfono inteligente o *smartphone*. Por supuesto, como un usuario más, y a diferencia del personaje de mi fábula, sé que el aparato no sólo es posible, sino que está al alcance de la mayor parte de las personas en una economía moderna (si no es un modelo reciente y trae una manzana como logotipo).

Mi aparato mágico y otros similares (como el reproductor de DVD portátil de un vendedor ambulante en mi vagón del Metro) son tan ubicuos que me cuesta trabajo entender el sentimiento de estar frente a un milagro que experimenta el personaje de mi relato al ver concentradas tantas funciones en un solo dispositivo. No obstante, si reflexiono con detenimiento, se trata de algo prodigioso: ¿qué tan complejo debe ser un aparato, qué instrucciones tan sutiles debe seguir para poder realizar operaciones tan diversas? Sin negar la sofisticación de la electrónica que está detrás de un teléfono o una computadora actual, resulta que todas las funciones anteriores se pueden reducir a las operaciones básicas de un mismo mecanismo. El modelo matemático más general de este mecanismo es, precisamente, la máquina universal de Turing.

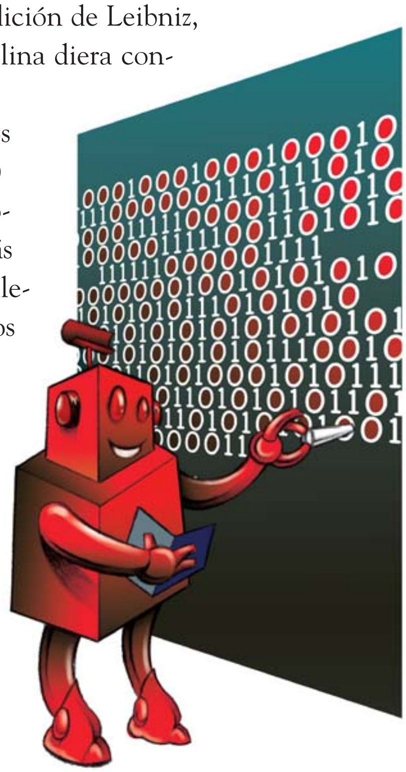
Algo igualmente curioso es que el origen de esta idea se encuentra en un problema planteado por matemáticos puros y que, en última instancia, proviene de una idea sembrada hace algunos siglos por un filósofo.

Leibniz y su sueño

En el siglo XVIII, Gottfried Wilhelm Leibniz, coinventor del cálculo, propuso un par de ideas revolucionarias en el terreno de la filosofía:

a) El uso de un lenguaje formal, abstracto, para expresar las ideas de manera independiente a la lengua natural del usuario (basado en un subconjunto de la lógica matemática, tal y como la conocemos hoy); y
b) la reducción del razonamiento a un proceso de cálculo (*calculus ratiocinator*); es decir, a la manipulación de los símbolos del lenguaje formal propuesto en (a) como un sustituto de la argumentación con palabras.

Las ideas de Leibniz no tuvieron el impacto deseado en el mundo de la filosofía, pero a finales del siglo XIX algunos matemáticos, como Frege, en Alemania, y Russell y Whitehead, en la Gran Bretaña, emprendieron un proyecto similar, limitado a las matemáticas. Se propusieron traducir el conocimiento matemático a fórmulas en un lenguaje lógico, para dejar claro cuáles eran los principios básicos de los que parte toda teoría matemática, y qué operaciones de razonamiento permiten derivar de estos principios el resto de los teoremas. Escogieron la lógica siguiendo la tradición de Leibniz, y con la esperanza de que esta disciplina diera confianza al resto de las matemáticas.



La aparición de algunos obstáculos (en particular las llamadas paradojas) llevaron a otros matemáticos a proponerse un programa de trabajo aún más radical. El líder de este grupo fue el alemán David Hilbert, quien a principios del siglo XX se planteó no sólo la formalización de las matemáticas en el estilo de Russell y Whitehead, sino también la resolución de los dilemas matemáticos por medio de un cálculo como el propuesto por Leibniz.

Una formulación extrema de esta idea aparece en el *problema de la decisión*, que Hilbert planteó como la pregunta siguiente: "Dados ciertos principios básicos de una teoría (axiomas) y una posible consecuencia de estos principios (candidato a teorema), ¿existe un 'procedimiento efectivo' para saber si el candidato a teorema es una consecuencia lógica de los axiomas, y por lo tanto amplía nuestro conocimiento de la teoría?"

Por supuesto, para contestar esta pregunta necesitamos saber primero qué se entiende por procedimientos efectivos. Hilbert se limitó a delinear los rasgos generales de éstos:

- Parten de representaciones simbólicas de los problemas que intentan resolver.
- Las operaciones que realizan se reducen a reglas para la manipulación de símbolos.
- Las reglas que definen un procedimiento deben ser finitas, tanto por la cantidad de reglas de un procedimiento dado, como por la cantidad de símbolos necesarios para expresarlas.
- Finalmente, un procedimiento efectivo debe darnos una respuesta (ya sea positiva o negativa) a un problema en un número finito de pasos.

Las propuestas de Hilbert encontraron eco en muchos partidarios entusiastas, pero también tuvo sus detractores y escépticos. En 1931 apareció en la escena el joven matemático Kurt Gödel, quien demostró (*grosso modo*) que los métodos defendidos hasta entonces por Hilbert eran insuficientes para validar *todas* las verdades matemáticas. Aunque este resultado no implica directamente que no existe un procedimiento efectivo para resolver el problema de la decisión, casi todos los matemáticos lo consideraron un buen indicio de que dicho procedimiento tal vez fuera imposible.

Para sustentar esta conjetura se necesitaba resolver una cuestión previa: ¿qué quiere decir exactamente un "procedimiento efectivo"? Es decir, hacía falta un modelo matemático del procedimiento. Una vez con el modelo adecuado, podría contestarse con rigor la cuestión de sus alcances prácticos.

Turing y su solución

Max Newman era un profesor de matemáticas en Cambridge con interés en el trabajo de Hilbert y Gödel. El entonces muy joven Alan Turing asistió en 1935 a una serie de pláticas de Newman, y decidió trabajar en el problema de la decisión.

Turing abordó el problema desde una perspectiva práctica: se inspiró en el trabajo de las personas que en aquella época se ganaban la vida haciendo cálculos matemáticos manuales. Estos cálculos eran necesarios en una amplia gama de aplicaciones industriales y militares, y había compañías que ofrecían sus servicios y que contaban con personas entrenadas para esto (muchos de ellos, estudiantes de matemáticas).

La persona recibía una serie de cálculos que debía realizar siguiendo una serie de fórmulas probadas. No hacía falta que utilizara su ingenio para resolver un problema. Por el contrario, era fundamental que siguiera instrucciones ciegamente para que su trabajo fuera confiable. Su estilo de trabajo se adaptaba perfectamente a la descripción de un procedimiento efectivo, pues estaba basado en un conjunto finito de instrucciones que se reducían, en última instancia, a la manipulación de símbolos.

Turing generalizó esta idea para definir sus "máquinas" (que son abstracciones matemáticas y no mecanismos físicos, a pesar del nombre). Los ingredientes eran los siguientes:

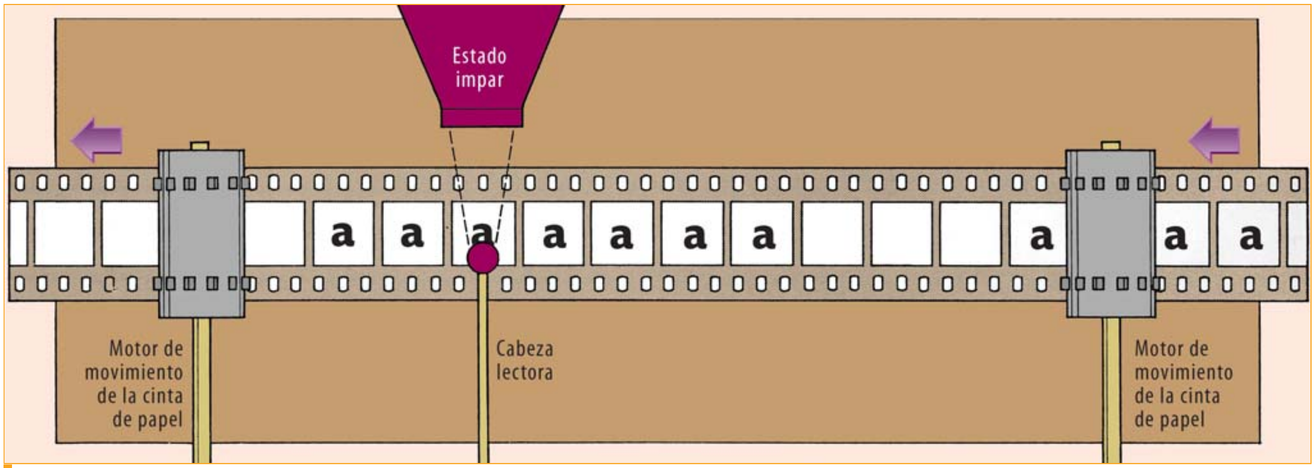
- Un alfabeto de símbolos (como los símbolos matemáticos utilizados en el cálculo).
- Un conjunto finito de estados mentales en los que puede encontrarse la máquina (similar a los estados mentales de un calculista: a la mitad de un cálculo, en la escritura en limpio de la solución, etcétera). Uno de estos estados es el de inicio, otro es el de un final con éxito, y el otro es el de un final con fracaso.
- Un conjunto finito de instrucciones, que se basan en el estado mental de la máquina y el símbolo que está leyendo.
- Una cantidad ilimitada de papel para realizar sus cálculos en la forma de una cinta con celdas que contienen, cada una, un solo símbolo.
- Una cabeza lectora que, en un momento específico, está leyendo el símbolo de una celda particular de la cinta.

La máquina recibe al principio una serie de símbolos y se encuentra en el estado de inicio. Dependiendo de sus instrucciones y del símbolo leído, reescribe el símbolo y avanza o retrocede según digan sus instrucciones.

Es claro que este mecanismo cumple con las especificaciones de Hilbert pero, ¿no es demasiado primitivo?, ¿puede realmente servir para realizar tareas complicadas?

Pensemos en una tarea elemental: recibimos "palabras" (que incluyen sólo la letra "a") y tenemos que contestar si tienen longitud par o impar, y quedarnos sólo con las pares. Las instrucciones de un máquina de Turing para realizar esto aparecen en la siguiente tabla:

Estado	*Símbolo*	*Nuevo estado*	*Nuevo símbolo*	*Movimiento de la cabeza lectora*
Inicial	a	Impar	Espacio	Avanza
Inicial	Espacio	Termina con éxito	Espacio	Avanza
Impar	a	Par	Espacio	Avanza
Impar	Espacio	Termina con fracaso	Espacio	Avanza
Par	a	Impar	Espacio	Avanza
Par	Espacio	Termina con éxito	Espacio	Avanza

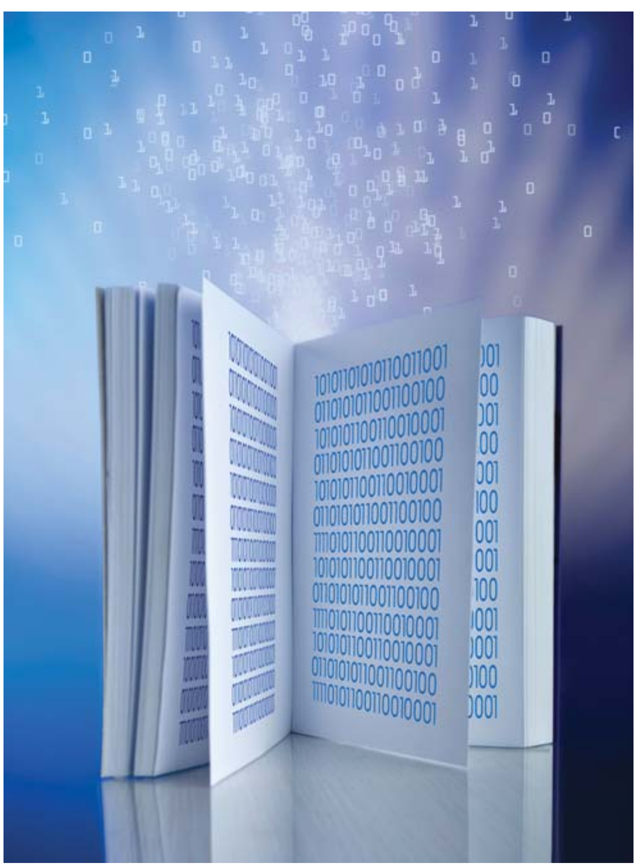


Máquina de Turing que determina si una palabra tiene un número par o impar de letras "a". El estado final de la máquina al terminar la lectura de la palabra determina la paridad de la palabra.

Como es obvio, el modelo de Turing se basa en describir en todos sus detalles el método empleado para resolver el problema. Esta descripción no da pie al uso encubierto de la inspiración o el azar.

La definición de Turing fue aceptada muy pronto, por su sencillez y elegancia, como la definición de procedimiento efectivo, a pesar de que existía al menos un rival cuya salida al mundo fue anterior a la propuesta de Turing (el "cálculo lambda" de Alonzo Church, matemático estadounidense). La demostración de que cualquier función calculable por medio de una máquina de Turing se puede calcular también a través de la propuesta de Church y viceversa (y que esto ocurre también con otros modelos propuestos posteriormente), llevó a la siguiente afirmación: "Todo problema que se puede resolver por medio de un procedimiento efectivo, puede resolverse a través de una máquina de Turing."

En honor de Turing y Church esta idea se conoce como la *Tesis de Church-Turing*, y para efectos prácticos ha permitido igualar la noción de *computable* (es decir, calculable por medio de una máquina de Turing) con la de procedimiento efectivo.



Afortunadamente, Turing no se limitó a una simple definición de sus máquinas, pues su teoría no nos acercaría al aparato mágico que ya describí. Imaginemos que para cada tarea resoluble por medio de un procedimiento hubiera que construir una máquina particular: una cámara para tomar fotografías, una máquina de escribir para hacer cartas, un aparato para escuchar música. Estaríamos en la situación de nuestro reportero y no en la de un usuario de un *smartphone*. No, Turing también demostró que no es estrictamente necesario tener una máquina para cada tarea, sino que *todas* las tareas pueden expresarse por medio de instrucciones para una "máquina universal", capaz de ejecutarlas todas.

El truco de Turing consiste en traducir la descripción de máquinas arbitrarias a una cadena de símbolos de un alfabeto único que pueden ser utilizadas como la entrada de la máquina universal. La máquina universal, entonces, lee las instrucciones para una máquina particular y las transforma en instrucciones propias, simulando el comportamiento de esa máquina particular.

Por ejemplo, la máquina universal podría trabajar sólo con el alfabeto binario de 0 y 1 y utilizar el siguiente esquema para codificar las instrucciones de la máquina de Turing que presenté antes:

"1" corresponde al símbolo de espacio vacío,
"11" corresponde a la letra "a",
"111" corresponde al estado inicial,
"1111" corresponde al estado impar, y
"111111" corresponde a avanzar.

Entonces, la instrucción "en el estado inicial si lees una *a* pasa al estado impar, escribe un espacio en su lugar y avanza", que es la primera instrucción de la tabla, se representaría así:

1110110111101011111 1
(los ceros actúan como separadores)

Con un esquema similar es posible codificar las instrucciones de cualquier otra máquina de Turing, por compleja que sea. Las instrucciones propias de la máquina

universal consisten en movimientos que le permitan leer la descripción codificada de otra máquina, la palabra que analizará la máquina particular y una serie de instrucciones que le permitan imitar lo que haría la máquina particular, en este caso. Dado que la máquina particular se limita a reescribir símbolos de acuerdo con instrucciones que dependen sólo del estado en que se encuentra en ese momento, es claro que las instrucciones de la máquina universal pueden definirse con reglas de la misma naturaleza (aunque muy tediosas de describir, y demasiado numerosas para presentarlas aquí).

Este mismo principio se aplica en todas las computadoras que utilizamos hoy en día, incluyendo los *smartphones*. La computadora o el *smartphone* son máquinas universales (aunque con limitaciones de memoria), y las máquinas que resuelven tareas específicas son los *programas* o "aplicaciones" que están *instaladas* en esa computadora (es decir, que residen en su memoria).

Una computadora típica cuenta con instrucciones muy básicas para leer símbolos (generalmente binarios), realizar operaciones con ellos (sumas, comparaciones, etcétera) y guardarlos en distintas partes de su memoria. Por otra parte, una "aplicación" (como la que permite escuchar música en el teléfono) se construye por medio de instrucciones en un *lenguaje de programación* que admite, entre otras cosas, describir sonidos digitalizados y ordenar su reproducción electrónica. Un programa especial llamado *compilador* traduce las instrucciones del lenguaje de programación a las instrucciones básicas de la computadora, para que ésta pueda ejecutarla.

En pocas palabras: ni en las máquinas de Turing ni en los *smartphones* existe magia detrás de la universalidad; simplemente son dos encarnaciones del mismo concepto.

Moraleja

Turing determinó qué se puede calcular mediante métodos efectivos, y en el proceso definió el modelo básico de una computadora. Su definición implica la posibilidad de reducir las soluciones de problemas particulares (que hubieran requerido mecanismos particulares) a instrucciones de una sola máquina universal. Este logro es lo que explica que hoy podamos contar con aparatos que ejecutan tareas tan disímbolas, mismas que un siglo atrás nadie hubiera podido creer que se pudieran realizar con una cajita que cabe en el bolsillo de la camisa.

Francisco Hernández Quiroz es profesor de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) desde 2001. Obtuvo el doctorado en Ciencias de la Computación en el Colegio Imperial de Londres. Sus temas principales de investigación son la lógica aplicada y la teoría de la computabilidad. Esta última, desde una perspectiva tanto técnica como filosófica.
fhq@ciencias.unam.mx

Lecturas recomendadas

Copeland, B. Jack (2004), *The essential Turing: seminal writings in computing, logic, philosophy, artificial intelligence, and artificial life plus the secrets of Enigma*, Oxford University Press.

Davis, Martin (2000), *The universal computer: the road from Leibniz to Turing*, W. W. Norton & Company.

Hodges, Andrew, administrador del sitio <www.turing.org.uk>.

Hodges, Andrew (2012), *Alan Turing: the enigma. The centenary edition*, Princeton University Press.

Turing, Alan Mathison (1936-1937), "On computable numbers, with an application to the *Entscheidungsproblem*", *Proceedings of the London Mathematical Society*, 42:230-265.